



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## NÁVRH VÝROBY ČEPU

DESIGN OF COUPLING PIN PRODUCTION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Blažek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Matěj Blažek**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh výroby čepu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh výroby součásti kruhovitého průřezu, která bude vyráběna víceoperačním protlačováním za studena. Na tuto problematiku bude také zaměřena literární rešerše i výpočty potřebné pro návrh a kontrolu nástroje.

### Cíle bakalářské práce:

- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na technologii protlačování,
- zhodnocení možností výroby,
- návrh vhodné technologie a provedení technologických a kontrolních výpočtů,
- návrh nástroje společně s vyhotovením výkresů vybraných dílů.

### Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William a Robert CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, xii, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0401-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

BLAŽEK Matěj: Návrh výroby čepu

---

Bakalářská práce je zaměřena na výrobu rotačního spojovacího čepu, vyráběného z oceli 11 320-5R. Součást je vzhledem k sériovosti  $500\,000 \text{ ks} \cdot \text{rok}^{-1}$  vyráběna objemovým tvářením za studena. Konkrétně se jedná o pēchování a dopředné protlačování. Ze dvou výrobních variant byla volena varianta s menším logaritmickým pētvořením. Z výpočtů byla stanovena potřebná síla pro výrobu, která činní  $F_c = 368,5 \text{ kN}$ . Od této hodnoty byl volen stroj AKP 3-5 od firmy Hatebur. Dále byl navržen postupový nástroj obsažený v příloze. Finálním krokem pak byla kontrola správnosti úvahy výroby simulacemi.

Klíčová slova: ocel 11 320-5R, dopředné protlačování, pēchování, objemové tvářen

## ABSTRACT

BLAŽEK Matěj: Design of Coupling Pin Production

---

Bachelor's thesis is aimed production of pin, made from steel 11 320-5R. This piece is in accordance to serial production  $500\,000 \text{ pieces} \cdot \text{year}^{-1}$  made by cold bulk forming. Specifically it is about heading and forward extrusion. From two production variant was chosen the one with lower strain. By calculations there was set the power needed for production that equals  $F_c = 368,5 \text{ kN}$ . Because of this power there was chosen a machine AKP 3-5 from company Hatebur. In the next step there was designed method that is in the attachment to the thesis. Final step was a control whether the idea of production by simulation is correct or not.

Keywords: 11 320-5R steel, forward extrusion, heading, bulk forming

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BLAŽEK, Matěj. *Návrh výroby čepu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132257>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V ..... dne 24. 1. 2021

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se vypracování bakalářské práce. Dále děkuji rodině, která mě podporovala během studia i mimo něj.

## **OBSAH**

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

## **ÚVOD**

### **1 ROZBOR ZADÁNÍ**

#### **1.1 Výrobní možnosti**

### **2 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZA STUDENA**

#### **2.1 Pěchování**

#### **2.2 Dopředné protlačování**

##### **2.2.1 Deformační pásma**

#### **2.3 Materiály pro protlačování**

#### **2.4 Technologičnost**

#### **2.5 Příprava polotovar**

#### **2.6 Nástroje pro objemové tváření**

##### **2.6.1 Nástroje pro pěchování**

##### **2.6.2 Nástroje pro protlačování**

#### **2.7 Protlačovací stroje**

### **3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY**

#### **3.1 Výpočet objemu a hmotnosti**

#### **3.2 Výrobní varianty**

##### **3.2.1 Varianta A**

##### **3.2.2 Varianta B**

##### **3.2.3 Zhodnocení variant**

#### **3.3 Stanovení výšek pro variantu A**

#### **3.4 Určení rychlostí deformace pro variantu A**

#### **3.5 Určení síly a práce v 1. operaci**

#### **3.5 Určení síly a práce v 2. operaci**

#### **3.7 Určení síly a práce v 3. operaci**

#### **3.8 Určení síly a práce v 4. operaci**

#### **3.9 Celková práce, síla a výkon**

#### **3.10 Volba stroje**

### **4 NÁVRH SESTAVY NÁSTROJE**

#### **4.1 Návrh průtlačnice**

#### **4.2 Návrh průtlačníku**

#### **4.3 Sestrojení nástroje**

### **5 NUMERICKÉ SIMULACE**

### **6 ZÁVĚR**

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

Str.

9

10

11

13

14

16

19

20

21

22

23

24

24

27

28

28

29

29

31

32

32

33

35

36

37

37

38

38

40

40

41

41

43

45



## ÚVOD [1], [2], [3], [4]

V dnešní době se ve strojírenství snaží co nejvíce ušetřit náklady na výrobu a co nejméně znečistit životní prostředí. Je tedy nutno zvýšit efektivitu a snížit množství vyprodukovaného odpadu, za podmínky zachování jakosti výrobku.

Tyto podmínky splňuje objemové tváření, které lze aplikovat pod, ale i nad teplotou rekrytalizace, tj. v aplikacích tváření za studena i za tepla. Po výrobě ve většině případů není potřeba dalších operací, z kterých by vznikl odpad. Dalšími výhodami jsou například snadná automatizace výroby, a s tím související zrychlení výrobního procesu. Neodmyslitelné je také zlepšení mechanických vlastností v důsledku deformací.

Velmi často používaná je metoda dopředného protlačování, která dosahuje vysokých jakostí výrobku. Touto metodou jsou zhotovovány především symetrické rotační součásti typu čep, nebo šroub. Lze ale vyrábět i nesymetrické rotační součásti, jak je možné vidět na obrázku 1, kde jsou uvedeny příklady výrobků zhotovených technologií protlačování.



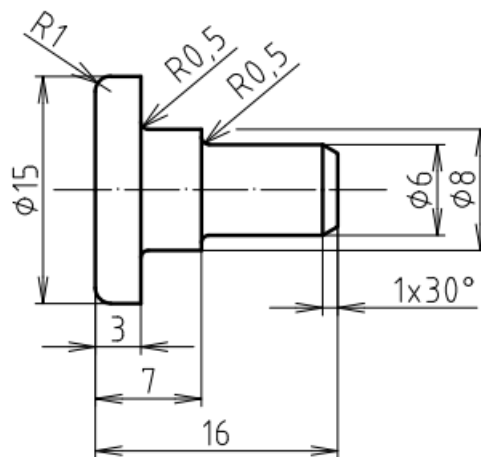
Obr. 1. Příklady výrobků zhotovených protlačováním za studena [4]

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ [2], [5], [6]

Vyráběná součást je symetrický rotační čep, který je vyobrazen na obrázku 2. Čepy se používají pro kloubové, nebo rotační spojení, ale také mohou být použity jako krátké nosné hřídele. Ve strojírenství se vyskytují například v spojkách automobilů. Součást lze rozdělit na tři části a to konkrétně na hlavu a dva dířky. Přesné rozměry jsou uvedeny na obrázku 3. Čep bude používán jako rotační spojka, je tedy nutné jeho kontrola na smyk a otláčení. Celková série výroby činí  $500\,000 \text{ ks} \cdot \text{rok}^{-1}$ .



a) 3D model



b) hlavní rozměry

Obr. 2 Vyráběný dílec

Při volbě vhodného materiálu, ze kterého bude zmíněný čep vyráběn, je nutno vzít v úvahu funkčnost, použití čepu a rovněž postup výroby. Je tedy nutné zvolit ocel, která zvládne zmíněné namáhání na smyk, otláčení a zároveň se dobře deformuje za studena.

Po srovnání několika materiálu, se jako nejlepší volba jeví konstrukční nelegovaná ocel 11 320-5R. Ta je mořena, žíhaná naměkko a tažena v mýdlovém prášku, což v označení materiálu vyjadřuje i doplňkové značení 5R. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1 a chemické složení je uvedeno v tabulce 2.

Tab. 1. Základní mechanické vlastnosti 11 320-5R [6]

Mechanické vlastnosti	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tažnost $A_5$ [%]	Modul pružnosti v tahu $E$ [GPa]
	589	614	15,2	201

Tab. 2. Chemické složení 11 320-5R [6]

Chemické složení	C [%]	S [%]	P [%]	Mn [%]	Si [%]	Al [%]	Cr [%]	Cu [%]
	0,05	0,012	0,017	0,33	0,06	0,027	0,16	0,06

## 1.1 Výrobní možnosti [2], [3], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]

Pro vyráběnou součást je možno zvolit z několika možností výroby. Při výběru vhodné technologie je nutno zhodnotit tvarovou složitost, velikost série, požadavky na tvarovou přesnost a v neposlední řadě i spotřebu materiálu. Lze tedy zvažovat hned několik možných technologií, jež jsou zmíněny níže:

- **Odlévání** – jedná se o metodu, kdy roztavený kov je lit do formy viz obrázek 3. Při odlévání je důležitý tvar výrobku a tedy i formy. V tomto případě by tak musela být součást opatřena technologickými úkosi, které usnadňují vyjímání hotového výrobku. Dalším faktorem je materiál, ze kterého je forma vyrobena. Může být použita jednorázová písková forma, nebo kovová forma, z níž jsou zpravidla přesnější odlitky a hodí se pro sériovou výrobu. Nevýhodou je ale fakt, že kovové formy se používají především pro neželezné kovy. K technologii odlévání také neodmyslitelně patří následné dokončovací operace. Z odlitku je nutno odstranit vtokovou soustavu a upravit funkční plochy, které často bez obrobení dosahují vysoké drsnosti povrchu a to až  $Ra = 25\mu m$ . Vzniká zde velké množství odpadu, jehož část je recyklovatelná, ale je zapotřebí dalších operací pro znovupoužití. Nevýhodou této technologie je časová náročnost celkové výroby, do které se zahrnuje například výroba modelu, ohřev, chlazení, nebo již zmíněné dokončovací operace.



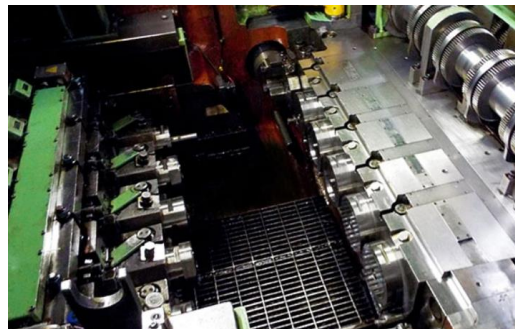
Obr. 3 Odlévání [9]

- **Obrábění** – v dnešní době jedna z nejpoužívanějších technologií ve strojním průmyslu. Princip metody spočívá v odebírání přebytečného materiálu z polotovaru ve formě třísky. Výhodou obrábění je vysoká přesnost výroby a to až v toleranci IT 6. Vysokých kvalit také dosahují drsnosti povrchů, které při dokončovacích operacích soustružení mohou být  $Ra = 1,6 \mu m$ . Jednou z největších nevýhod při obrábění je porušování průběhu vláken. Mezi další nevýhody patří ztráta materiálu tj. vysoké procento odpadu. Při soustružení je ve většině případů polotovarem kruhová tyč. Ta ovšem nesplňuje dokonalou kruhovitost hotového výrobku a je zde nutný další přírůstek. Z tohoto důvodu je soustružení ve velké sérii nerealizovatelné kvůli vysoké odpadovosti. Výroba součástí soustružením je vyobrazena na obrázku 4.



Obr. 4 Soustružení [12]

- **Protlačování** – technologie, spadající pod objemové tváření. Změna tvaru polotovaru je způsobena plastickou deformací, které předchází deformace pružná. Pro dosažení přesných rozměrů se jedná o tváření za studena. Teploty tedy zdaleka nedosahují teplot rekrystalizace. V průběhu operací dochází ke zpevňování a tím k zlepšení mechanických vlastností zpracovaného materiálu. Mezi další přednosti patří výborná jakost povrchu a vysoká přesnost výroby. Opomenout by se určitě neměli ani krátké výrobní časy. U technologie protlačování je obrovskou výhodou nízká spotřeba materiálu, která vede k téměř nulovému odpadu. Využití materiálu se pohybuje v rozmezí 90 až 100 %. Nevýhodou je výroba nástrojů, které jsou pouze jednoúčelové, a jsou vhodné pouze pro velké série. Na obrázku 5 je vidět postupový automat pro výrobu součástí dopředným protlačováním.

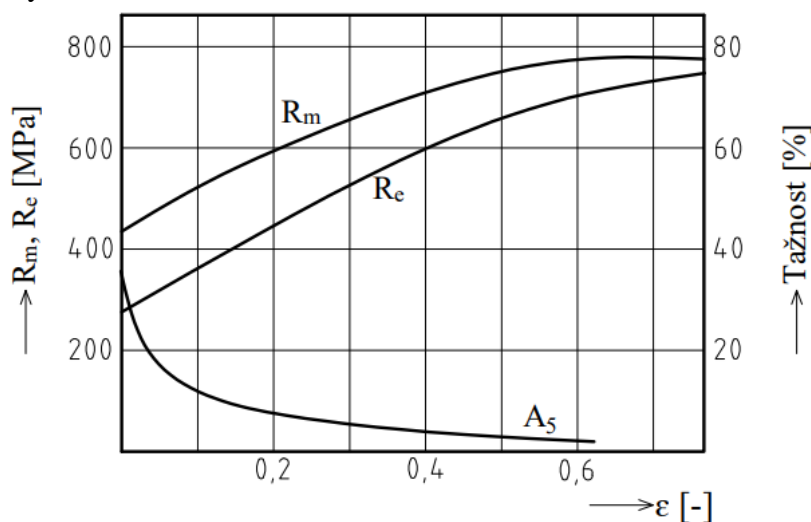


Obr. 5 Protlačovací automat [3]

Při porovnání technologií odlévání, obrábění a protlačování je volena nejvhodnější. Odlévání je z důvodu vysoké energetické náročnosti nevhodná, obráběním dochází ke ztrátě velkého množství materiálu z důvodu velké série. Vzhledem k již zmíněné velikosti série, která činí  $500\,000 \text{ ks} \cdot \text{rok}^{-1}$ , úspoře materiálu a mechanickým vlastnostem je jako nejvhodnější metoda volena protlačování, na kterou bude následně zaměřena i literární rešerše práce.

## 2 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZA STUDENA [1], [2], [11], [13], [14], [15], [16], [17]

Technologie tváření za studena je založena na principu trojosé tlakové napjatosti. Ta vede k deformacím a změnám tvaru součástí. V průběhu tváření dochází ke změně mechanických vlastností. Především dochází ke značnému zpevnění a tím ke zvýšení pevnosti a tvrdosti součástí s úměrným snížením plasticity a houževnatosti. Přetvářený materiál poté dosahuje vyšších hodnot meze kluzu a meze pevnosti. Je tedy možné pro výrobu volit méně hodnotný materiál, který v průběhu výroby změní svoje mechanické vlastnosti a bude splňovat podmínky, jako kvalitnější ocel. Zpevnění většinou není rovnoměrné, a to z důvodu nestejnoměrného stupně deformace v různých částech součástí. Na obrázku 6 jsou vyobrazeny změny průběhu mechanických hodnot při tažení v oceli s 0,1 % uhlíku. Při výrobě tzv. za studena nedochází ke změně krystalové mřížky vlivem tepla. Ocel je zpracovávána výrazně pod teplotou rekrystalizace.



Obr. 6 Průběh deformace [11]

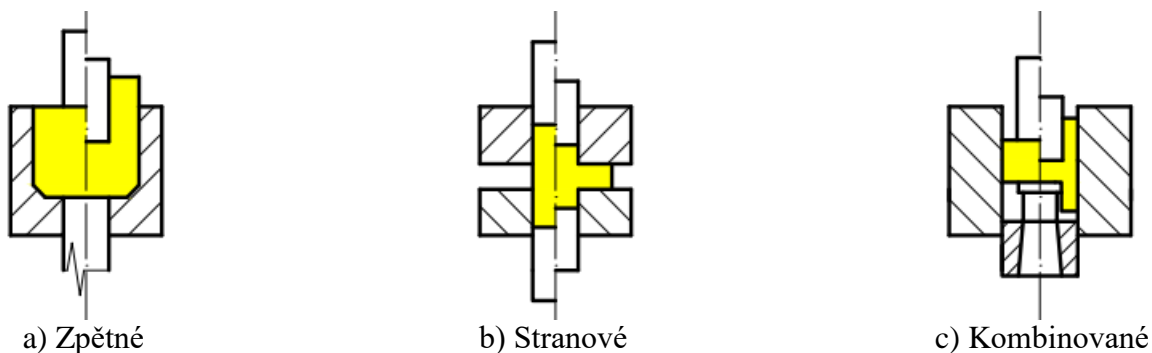
Výroba je vhodná pouze pro velké série, pro které se vyplatí vyrobít jednoúčelový nástroj. V případě, kdy se nástroj vyplatí vyrobít, dochází k velkým ekonomickým úsporám. Jednou z největších úspor je využití materiálu. To se pohybuje v rozmezí 90 až 100 %. Mezi další výhody patří jednoduchá automatizace, která vede ke snížení výrobních časů a úspoře energie. Jakost hotového výrobku dosahuje přesnosti IT6 a drsnosti povrchu až  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Největší benefit protlačování je zlepšování mechanických vlastností. Nedochází k přerušení vláken jako například u soustružení a materiál je tak lépe odolný vůči namáhání a to z důvodu zhuštění vláken.

Pro objemové tváření za studena je teoreticky vhodná jakákoliv ocel, která je schopna se deformovat za teplot nižších, než je teplota rekrystalizace. V praxi je ale nutné si ověřit hospodárnost zvoleného materiálu. Pokud deformace oceli v jednotlivé operaci nedosahuje alespoň 25 %, nebo je nutno vyvodit tvářecí tlak větší než 2450 MPa, ocel nesplňuje hospodárnost a je nevodná. Opomenout by se neměla ani příprava daného materiálu, který je nutno fosfátovat a mazat.

Technologie objemového tváření tak může být rozdělena podle toku materiálu, nebo způsobu tváření. S řešenou problematikou pak mají význam především níže zmíněné:

- dopředné protlačování (viz obrázek 10),
- zpětné protlačování (viz obrázek 7a),
- stranové protlačování (viz obrázek 7b),
- kombinované protlačování (viz obrázek 7c),
- hydrostatické protlačování,
- pěchování (viz obrázek 8).



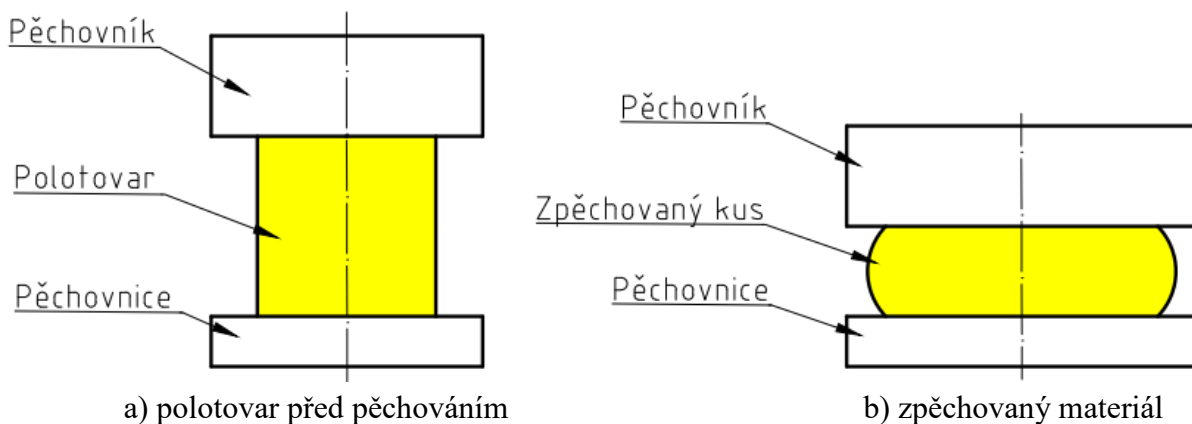


Obr. 7 Typy protlačování [11]

## 2.1 Pěchování [1], [2], [6], [11], [13], [14], [17], [18]

Technologie pěchování nemusí být vždy využita pouze jako výrobní operace. Lze ji také využít jako základní zkoušku zjišťování mechanických vlastností. Mezi tyto vlastnosti patří deformační odpor. Ten je definován jako vnitřní odpor materiálu vůči působení vnějších sil, při kterých nastane počátek plastického přetvoření.

Při využití technologie pro výrobu součástí, je pěchování jedna z nejpodstatnějších částí objemového tváření. Ve většině případů se jedná o zpracování mezi rovnoběžnými rovinami. Principem je snižování výšky a zvětšování příčného průřezu viz obrázek 8. Tato metoda je zastoupena v hromadné a velkosériové výrobě, kde je využívána především pro výrobu normalizovaných spojovacích součástí typu šroub, nýt, čep. Může být ale použita i jako přípravná operace pro tvarově složitější součást, která bude dále zpracovávána.



Obr. 8 Princip pěchování [13]

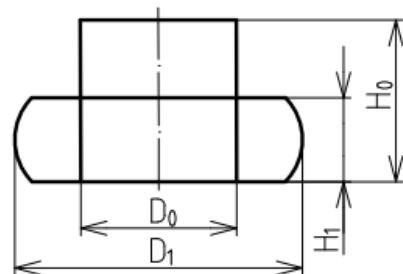
Pro běžné použití se používá pevný pěchovník, který je zhotoven ze tří jednoduchých, a lehce vyměnitelných částí. Pro krátké kusy je využíván odpružený trn, který usnadňuje výměnu zavedení ústřížku. Pro dlouhé kusy je pak vhodný odpružený pěchovník.

Deformace v tvářeném tělese není rovnoměrná, a to především z důvodu tření, vzniká zde soudečkovitý nerovnoměrný tvar. Pro zjednodušení je ve vzorcích tření zanedbáno. Výsledný tvar je pak uvažován jako válec o největším možné průměru.

Stupeň přetvoření je limitován zpevněním materiálu, který nesmí překročit určité limity, aby nedocházelo k vzniku trhlin v součásti. Přetvoření je vyjádřeno logaritmicky (2.1), nebo poměrnou změnou průřezu (2.2). Na obrázku 9 jsou vyobrazeny rozměry uvedené ve vzorcích.

$$\varphi = \ln \frac{H_1}{H_0} = \ln \frac{S_0}{S_1} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} \quad (2.1)$$

kde:  $\varphi$  - logaritmické přetvoření [-],  
 $H_1$  - výška zpěchovaného dílce [mm],  
 $H_0$  - výška polotovaru [mm],  
 $S_1$  - obsah průřezu zpěchovaného dílce [mm<sup>2</sup>],  
 $S_0$  - obsah průřezu polotovaru [mm<sup>2</sup>],  
 $D_1$  - průměr zpěchovaného dílce [mm],  
 $D_0$  - průměr polotovaru [mm].



Obr. 9 Rozměry pěchované součásti [2]

$$\varepsilon = \frac{S_1 - S_0}{S_1} \cdot 100 = \frac{D_1^2 - D_0^2}{D_1^2} \cdot 100 = \left(1 - \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \cdot 100 \quad (2.2)$$

kde:  $\varepsilon$  - poměrné přetvoření [%].

Pro další výpočty je nutno zjistit rychlost deformace dle vzorce (2.3). Tato hodnota je závislá na rychlosti pohybu nástroje, která se vypočte podle rovnice (2.4).

$$\dot{\varphi} = \frac{v_0}{h_D} \quad (2.3)$$

kde:  $\dot{\varphi}$  - rychlost deformace [s<sup>-1</sup>],  
 $v_0$  - rychlost pohybu nástroje [m·s<sup>-1</sup>],  
 $h_d$  - vztažná výška [m].

$$v_0 = \frac{s}{t} = \frac{n_{\text{zdvih}} \cdot 2 \cdot h_{\text{beranu}}}{t \cdot 10^3} \quad (2.4)$$

kde:  $s$  - dráha pohybu nástroje [mm],  
 $t$  - čas [s],  
 $n_{\text{zdvihu}}$  - počet zdvihů beranu [min<sup>-1</sup>],  
 $h_{\text{beranu}}$  - zdvih beranu [mm].

Mezi potřebné hodnoty patří také přirozený přetvárný odpor, který může být vypočten z konstitutivního vztahu dle Johnson-Cooka (2.5).

$$\sigma_p = (\sigma_o + B \cdot \varphi^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_o}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_o}{T_m - T_o}\right)^m\right] \quad (2.5)$$

kde:  $\sigma_p$  - přirozený přetvárný odpor [MPa],  
 $\sigma_o$  - statická mez kluzu [MPa],  
 $B$  - pevnostní parametr [-],  
 $n$  - exponent zpevnění [-],  
 $C$  - citlivost na rychlost deformace [-],  
 $\dot{\varphi}_o$  - referenční rychlost přetvoření [s<sup>-1</sup>],  
 $T$  - teplota materiálu [K],  
 $T_o$  - referenční teplota [K],  
 $T_m$  - teplota tavení [K],  
 $m$  - exponent citlivosti s ohledem na rychlost deformace [-].

Deformační odpor lze vypočítat za pomoci vzorce podle Siebela (2.6), kde je možné zjistit střední napětí. V tomto vzorci je počítáno s neměnným normálovým napětím po celé výšce tvářené součásti. V případě pěchování složitějších tvarů, ale i například hlav šroubů, je nutno vztah rozšířit podle Navrockého. Vzorec je tak doplněn o součinitel charakteru deformace a součinitel nerovnoměrnosti napětí (2.7). S tímto napětím je dále vypočtena potřebná tvářecí síla, popřípadě práce.

$$\sigma_D = \sigma_P \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{H}\right) \quad (2.6)$$

kde:  $\sigma_D$  – střední napětí [MPa],

$f$  – součinitel tření [-].

$$\sigma_D = \sigma_P \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{H}\right) \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (2.7)$$

kde:  $k_1$  – součinitel charakteru deformace [-],

$k_2$  – součinitel nerovnoměrnosti napětí [-].

Tvářecí síla potřebná pro návrh nástrojů a volbu správného lisu se vypočítá ze vztahu (2.8). Pro přetvárnou práci je vzorec (2.9), pro kterou je nutno vypočítat měrnou přetvárnou práci (2.10). Na obrázku 10 je vyobrazen průběh pracovní síly při pěchování. Finální výkon stroje potřebný pro tváření je uveden ve vzorci (2.11).

$$F_p = \sigma_D \cdot S \quad (2.8)$$

kde:  $F_p$  – tvářecí síla [N].

$$A = A_j \cdot V \quad (2.9)$$

kde:  $A$  – přetvárná práce [J],

$A_j$  – měrná přetvárná práce [ $\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$ ],

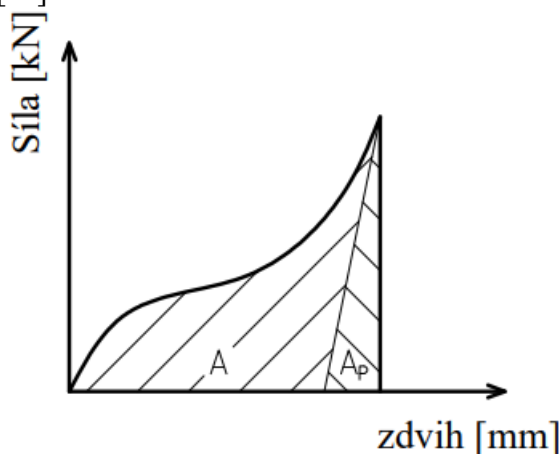
$V$  – objem [ $\text{mm}^3$ ].

$$A_j = \sigma_{ps} \cdot \varphi \cdot 10^{-3} \quad (2.10)$$

kde:  $\sigma_{ps}$  – přirozený přetvárný odpor (střední hodnota) [MPa].

$$P = \frac{A}{t} = \frac{A \cdot n_{zdvih}}{t} \quad (2.11)$$

kde:  $P$  – výkon [W].

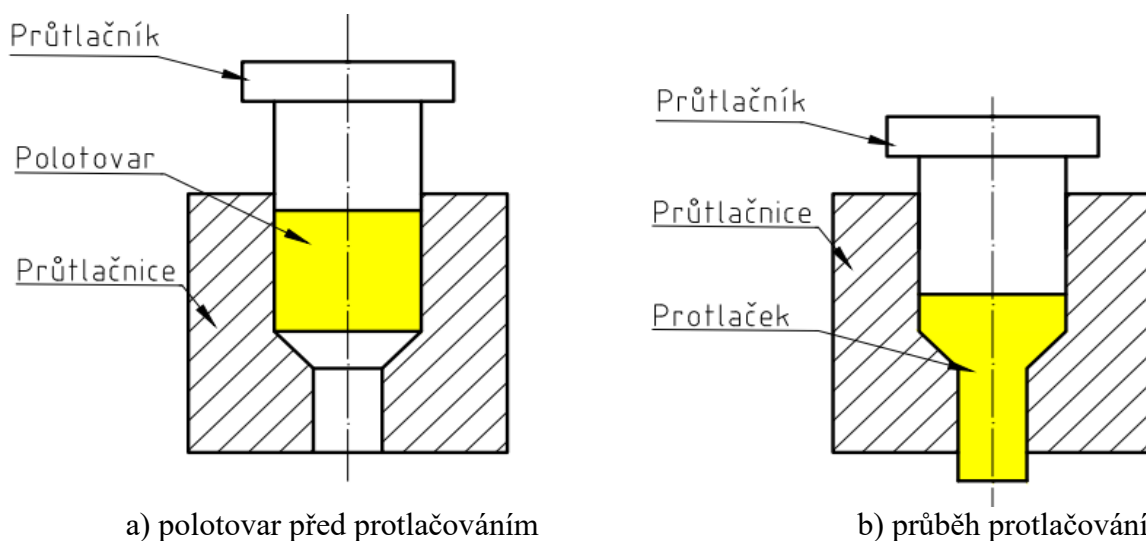


Obr. 10 Průběh práce při pěchování [2]

## 2.2 Dopředné protlačování [1], [2], [11], [13], [14], [17], [18], [19]

Technologie protlačování spočívá v obdobných principech, jako výše zmíněné pěchování. Zpracovávaný materiál se vlivem působení nástroje (průtlačník) vtlačuje do dutiny tzv. průtlačnice, viz obrázek 11.





Obr. 11 Princip dopředného protlačování

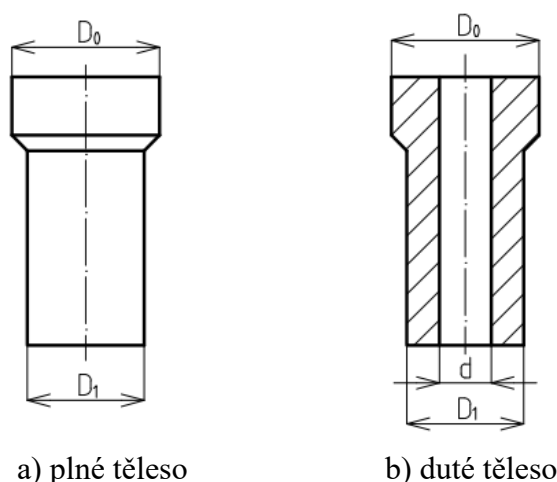
Při samotné výrobě součástí teče materiál totožným směrem, jako průtlačník. Tato technologie se využívá pro zmenšování průměrů plných a dutých tyčí. Může být ale použita v kombinaci s dalšími druhy objemového tváření, jako například pěchování a zpětné protlačování. Velmi často jsou zmíněné kombinace využívány pro výrobu součástí typu čep.

Pro dopředné protlačování plného materiálu jsou využívány průtlačníky celistvé, které se liší pouze upínací částí. V případě protlačování dutého polotovaru mohou být využity průtlačníky z více kusů, kde nedochází k velkému namáhání nástroje.

Plná tělesa lze protlačovat v otevřené, nebo v uzavřené průtlačnici. Volba uzavřeného protlačování je vhodná tehdy, pokud je vypočtená deformace větší než 30 %. V tomto případě musí být polotovár zaveden celý do průtlačnice, aby nedocházelo k napěchování vysunutě části. Při deformacích menších než 30 % se materiál nepřechuje a může být volena otevřená varianta. Použití této metody je možné, pokud délka přechínající části nepřesahuje dvanácti násobek průměru.

Dále je možno dělit dopředné protlačování na kvazistatické a dynamické. U kvazistatického dopředného protlačování je pracováno s hydraulickými lisami a děj probíhá za izotermických podmínek. U dynamického jsou využívány vysokorychlostní automaty, u kterých je možno zvýšit tvářecí rychlost.

Obdobně jako u pěchování je stupeň deformace limitován zpevněním materiálu. Opět lze přetvoření vyjádřit logaritmicky, nebo poměrnou změnou průřezu. Logaritmické přetvoření lze vypočítat za pomoci vzorce (2.12) pro plné průřezy a (2.14) pro trubkové součásti. Poměrná změna se pak vypočte dle vzorce (2.13) v případě plného tělesa a (2.15) v případě dutého. Pro přehlednost jsou rozměry protlačovaných součástí vyobrazeny na obrázku 12.



Obr. 12 Schéma výrobků [2]

Pro plné průřezy:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S_1} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{S_1}{S_0}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{D_1^2}{D_0^2}\right) \cdot 100 \quad (2.13)$$

Pro duté průřezy:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{D_0^2 - d^2}{D_1^2 - d^2} \quad (2.14)$$

kde: d – průměr otvoru [mm].

$$\varepsilon = \left(\frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2 - d^2}\right) \cdot 100 \quad (2.15)$$

K výpočtu rychlosti deformace v jednotlivých operacích bude použita rovnice (2.16).

$$\dot{\varphi} = 2 \cdot v_0 \cdot \frac{R_0^2}{R^3} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2.16)$$

kde:  $R_0$  – výchozí poloměr [m],

$R$  – konečný poloměr [m],

$\alpha$  – redukční úhel [°].

Pro výpočet deformačního odporu lze použít jeden z nejvíce používaných vzorců dle Feldmanna (2.17). Dalším příkladem pro výpočet střední hodnoty deformačního odporu je vzorec podle Siebela (2.20).

$$\sigma_D = \sigma_{ps} \left[ \left(1 + \frac{f_1}{\hat{\alpha}}\right) \ln \left(\frac{D_1}{D_3}\right)^2 + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] + 4f_2 \frac{L_3}{D_3} \sigma_{ps} + 4f_1 \frac{L_1}{D_1} \sigma_{p1} \quad (2.17)$$

kde:  $f_1, f_2, f_3$  – součinitel tření [-],

$\hat{\alpha}$  - úhel kužele v obloukové míře [rad],

$D_1, D_3$  – výchozí a konečný průměr součásti [mm],

$L_1$  – výška části kontejneru [mm],

$L_3$  – výška redukčního oka [mm].

$$\hat{\alpha} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha}{180} \quad (2.18)$$

kde:  $\alpha$  – redukční úhel [°].

$$\sigma_{ps} = \frac{\sigma_{ps1} + \sigma_{ps2}}{2} \quad (2.19)$$

kde:  $\sigma_{ps1}$  – přirozený přetvárný odpor v 1. operaci [MPa],

$\sigma_{ps2}$  – přirozený přetvárný odpor v 2. operaci [MPa].

$$\sigma_D = \sigma_p \cdot (\varphi + 0,6) \cdot \left(1,25 + 4f \cdot \frac{H_0}{D}\right) \quad (2.20)$$

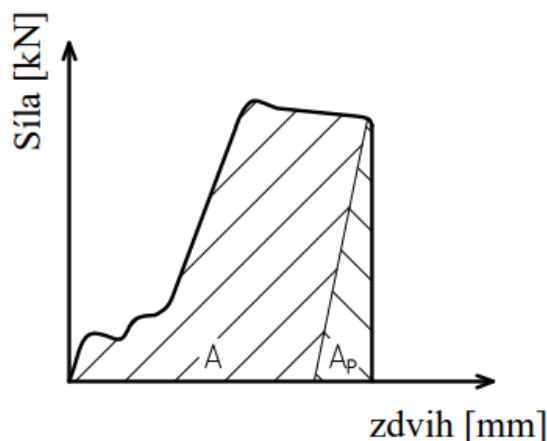
Kde pro výpočet přirozeného přetvárného odporu může být využita Hollomonova aproximace dle vztahu (2.21).

$$\sigma_p = k \cdot \varphi^n \quad (2.21)$$

kde:  $k$  – materiálová konstanta [MPa],

$n$  – exponent zpevnění [-].

Pro výpočet tvářecí síly, práce a výkonu pro protlačování jsou využity totožné vzorce (2.8, 2.9, 2.10, 2.11) jako pro protlačování. Jediná změna nastane v průběhu práce, viz obrázek 13.

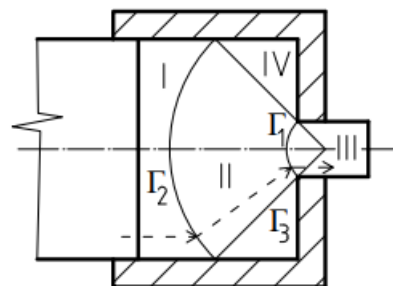


Obr. 13 Průběh práce při protlačování [2]

### 2.2.1 Deformační pásma [11], [21]

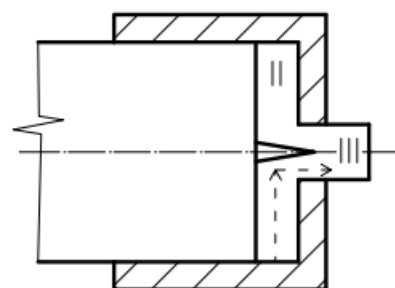
V počátku procesu dopředného protlačování vznikají vlivem tlaku v tvářeném materiálu deformace. Tyto deformační podmínky mají rozdílné vlastnosti v počáteční fázi a v konečné fázi, kdy je značné množství materiálu již zpracováno.

- Počáteční fáze – V průběhu počáteční fáze dopředného protlačování vznikají čtyři deformační pásma, která jsou vyobrazeny na obrázku 14 a jsou značeny římskými číslicemi I, II, III a IV. První pásmo je před deformací, kde rychlost tečení materiálu je rovna rychlosti průtlačníku. Druhé je deformační. Dochází zde k plastické deformaci a přetvoření. V třetím je již po deformaci. Poslední čtvrté pásmo je nazýváno mrtvé pásmo a nedochází už k žádným změnám, tudíž ani k deformaci. Tyto pásma jsou od sebe odděleny plochami diskontinuity rychlosti, které značí změnu rychlostí tečení materiálu. První a druhá plocha má sférický tvar. Třetí má kuželový tvar. Na obrázku 14 jsou plochy značeny  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$ .



Obr. 14 Počáteční fáze [20]

- Závěrečné stádium – Toto stádium nastává v okamžiku, kdy se čelo průtlačníku dotkne plochy diskontinuity rychlosti  $\Gamma_2$ . Z původně čtyř deformačních pásem zůstávají pouze dvě a to pásmo deformace II a pásmo po deformaci III. Ze tří ploch diskontinuity zůstává jen jedna. V případě nesprávně volené konstrukce průtlačnice, materiál teče nevhodně a vzniká vada. Tato vada se nazývá vtaženina a je znázorněna na obrázku 15.



Obr. 15 Závěrečné stádium [20]

## 2.3 Materiály pro protlačování [2], [7], [14], [17], [21], [22]

Teoreticky jsou pro protlačování vhodné všechny oceli. Tato možnost je v praxi značně limitována potřebnými protlačovacími silami, které zatěžují stroj a nástroj. V případě nutnosti vysokých sil dochází k rychlejšímu opotřebení nástroje a ke snížení ekonomičnosti výroby z nutnosti výroby nového nástroje. Tyto síly ovlivňuje především chemické složení, které se dále podílí na mechanických vlastnostech.

Jeden z hlavních prvků ovlivňujících mechanické vlastnosti je uhlík. Ten se nachází v krystalové mřížce a tvoří intersticiální atom, který poté s železem tvoří karbid železa. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku tak klesá tvárnost, kontrakce a vrubová houževnatost, ale současně stoupá mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost. Pro tváření za studena je nejvhodnější obsah uhlíku pod 0,25 %. Kritické množství je 0,5 %, pro větší obsahy je nutno materiály přehřívát a pro protlačování za studena jsou nevhodné.

Dalším významným prvkem je křemík. Ten zvyšuje mez pevnosti, mez kluzu, tvrdost a zároveň snižuje tažnost, kontrakci a vrubovou houževnatost. Největší nevýhodou je snižování tvárnosti a větší výskyt nekovových vměstků. Křemík se ale nejčastěji používá jako dezoxidační prvek. V případě, kdy je jako dezoxidant použit pouze křemík, může jeho obsah dosahovat až na 0,35 %. Toto množství je současně horní hranice tvárnosti. Pokud je toto množství překročeno, ocel je příliš křehká.

Pro výrobu oceli je velmi podstatný rovněž mangan, který se rozpouští ve feritu. Jeho největší výhodou je schopnost na sebe vázat síru. Zabraňuje tak vzniku sulfidu železa, jenž je pro tváření nevhodný. Zároveň zvyšuje pevnost, tvrdost a houževnatost při zachování plastických vlastností. Pro nízkouhlíkové oceli je nutným prvkem, který by se měl vyskytovat v obsahu okolo 0,4 %.

Jako nežádoucí prvek v ocelích je brána síra, která má nízkou rozpustnost ve feritu a cementitu. Vylučuje se tak při ochlazování z tuhém roztoku ve formě nových sloučenin. Příkladem může být sloučenina s železem, nebo manganem tvořící vměstky. Ty poté snižují houževnatost. Maximální doporučené množství síry v oceli pro tváření je 0,035 %.

K dalším nevhodným prvkům patří fosfor, ten v oceli způsobuje křehkost a má sklon k odměšování, což má za příčinu vznik řádkové struktury. Podobně jako u síry by fosfor v oceli pro tváření neměl dosahovat vyšších obsahů než 0,035 %.

Přítomnost hliníku v uhlíkových ocelích zvyšuje tvárnost, ale zároveň by jeho množství nemělo překročit hranici 0,15 %.

Na mechanické vlastnosti má vliv i samotná struktura materiálu. Makrostruktura pro objemové tváření za studena se musí charakterizovat stejnorodou strukturou bez většího množství nekovových vměstků a jejich seskupení, porézности, bublin, trhlin a segregací.

Z pohledu mikrostruktury je pro technologii protlačování nejlepší možnost feriticko-perlitická struktura, přičemž perlit by měl být globulární. Taková mikrostruktura zaručuje největší měkkost a houževnatost. Se zvyšujícím se obsahem perlitu je snižována pevnost, naopak se zvyšujícím se množstvím feritu tvárnost vzroste.

Obecně lze oceli pro protlačování za studena rozdělit do tří skupin. V první skupině značené A se vyskytují materiály s vysokou tvárností za velmi nízkých protlačovacích tlaků a pro největší redukce. Do druhého bloku B jsou řazeny oceli se střední tvárností a s vyšší pevností v protlačované stavu. V poslední skupině C jsou tvrdé materiály s malou tvárností, vysokými tlaky a s vysokou pevností v konečném stavu.

## 2.4 Technologičnost [2], [7], [13], [14], [23]

Při výrobě součásti protlačováním je v některých případech nutno přizpůsobit tvar tak, aby bylo možné jej vyrobit co nejefektivněji. Dopředným protlačováním za studena lze vyrábět jak symetrické tak nesymetrické součásti. Symetrické součásti jsou především čepového tvaru, viz obrázek 16a. Je možné ale tvářet i nízké duté tvary, které jsou znázorněny na obrázku 16b. Nesymetrické protlačování je velmi složitou operací a není příliš rozšířeno.



a) součásti typu čep

b) nízké duté součásti

Obr. 16 Vhodné součásti výroby [17]

U návrhu součásti je třeba dodržovat podmínky vyrobiteľnosti. Jako nevhodné řešení je návrh součásti, kde je materiál nesymetricky nahromaděn na jedno místo. Je tedy snaha jej rovnoměrně rozprostřít po celém obsahu.

Náhlé přechody tloušťky stěn je nutno nahradit postupnými přechody. Taktéž místní zúžení je pro technologii dopředného protlačování nevyrobitelné.

Ostré hrany a rohy se musí opatřit úkosem nebo zaoblením. V případě neupravení konstrukce teče materiál nevhodně a mohou vznikat trhliny. Minimální vyrobiteľný úhel je  $27^\circ$ . Nesprávná konstrukce je na obrázku 17a a správné možnosti úpravy viz 17b.

Dlouhé kuželové plochy je téměř nemožné vyrobit z důvodu nerovnoměrného tření. Jsou tedy nahrazeny postupným snižováním průměru.

V poslední řadě, pokud je to možné je třeba volit vnější i vnitřní plochy rovnoběžně se směrem pracovní dráhy nástroje.



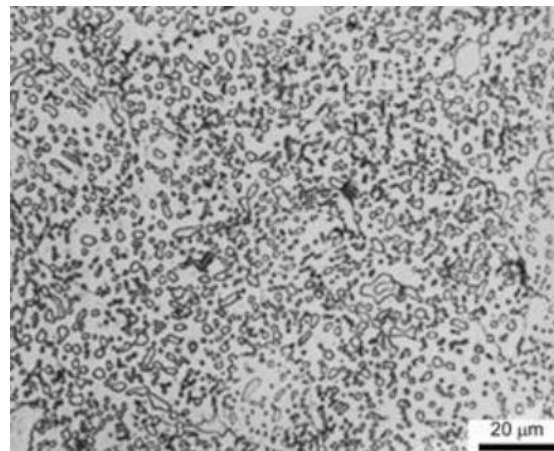
a) nevhodný roh

b) vhodné úpravy

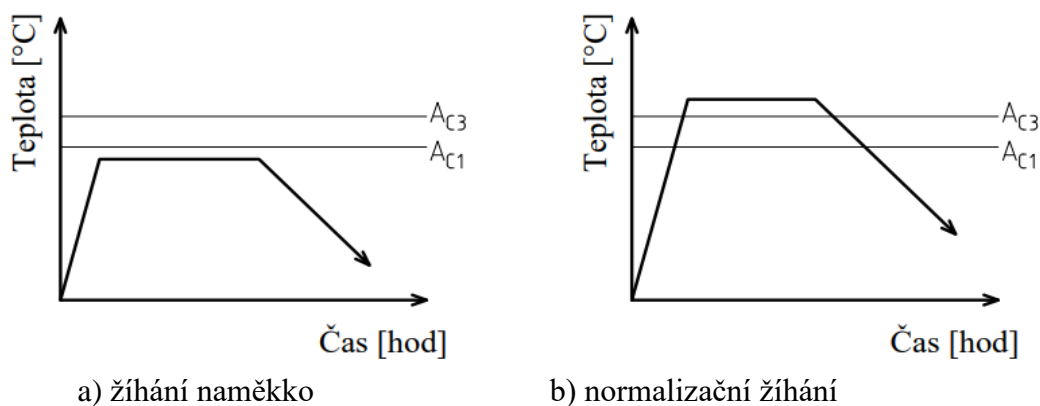
Obr. 17 Technologičnost ostrých hran [17]

## 2.5 Příprava polotovaru [7], [21], [22], [24], [25]

V průběhu tváření dochází k značné změně mechanických vlastností a je proto nutno před výrobou polotovaru tepelně zpracovat. U technologie protlačování za studena je volba tepelného zpracování směřována na žíhání naměkko, nebo normalizační. U prvně jmenované je již podle názvu možno usoudit, že jde o snížení tvrdosti. Daných změn je dosaženo sferoidizací cementitu. Dochází tak k přeměně lamelárního perlitu na globulární viz obrázek 18, který je pro tváření velmi výhodný. Žíhání podeutektoidních ocelí probíhá v oblasti teploty  $A_{c1}$ , což je přibližně 600 až 720 °C. Pro legované oceli se používají teploty vyšší než  $A_{c1}$ , protože zde dochází k rychlejší sferoidizaci. Doba setrvání se pohybuje okolo čtyř hodin. Ochlazování je poté řízené a probíhá v žíhacích pecích. Závislost teploty na čase je vyobrazeno na obrázku 19a. Při normalizačním žíhání je účelem zjemnění austenitického zrna a zrovnoměnění sekundární struktury. Jde tedy o zjemnění struktury u ocelí s nižším obsahem uhlíku. U podeutektoidních ocelí je teplota vyšší o 30 až 50 °C, než teplota  $A_{c3}$ . Ochlazování pak může probíhat dvěma způsoby. Prvním možností je na klidném vzduchu, druhou možností je pak ochlazování v peci. Přičemž ochlazování v peci je bezpečnější z důvodu menšího rizika vzniku vnitřního pnutí. Rychlost chladnutí v perlitické oblasti přeměny pak má vliv na výslednou strukturu. Při malém přechlazení dochází k zhrubnutí struktury, která je pak tvárnější a měkkší. Na obrázku 19b je zobrazena závislost setrvání času na určité teplotě pro zmíněné tepelné zpracování pro normalizační žíhání.



Obr. 18 Globulární perlit [21]



Obr. 19 Závislost času na teplotě [21]

Po procesu tepelného zpracování následuje mechanické čištění. To spočívá v odstranění povrchových nečistot vzniklých předchozími operacemi. Čištění může být řešeno kartáčováním, nebo broušením. Dalším krokem přípravy je odmaštění polotovaru, které ve většině případů probíhá v alkalické lázni. S následným oplachem v horké vodě o přibližné teplotě 80 °C.

Po oplachu se provádí moření, kterým se odstraňují oxidické nečistoty z povrchu. Působením kyselin se oxidy převedou na soli. Těch je zbavováno oplachem vodou s následným aktivačním oplachem. Nejčastěji se pro moření používají kyseliny, konkrétně pak kyselina sírová, nebo solná.



Velmi podstatnou částí přípravy je fosfátování. Na povrchu polotovaru se vytvoří fosfátový povlak. Ten sice nekryje celou plochu dokonale, ale je pórovitý. Tato pórovitost je velmi výhodná, aby na polotovaru mohli ulpívat maziva potřebné pro výrobu. Maziva se pak do fosfátové vrstvy absorbují a zároveň vznikají kovová mýdla, která pomáhají snižovat tření. Fosfátovací lázeň by měla mít teplotu 90 °C a trvat čtyři až dvanáct minut. Se součástí by se během procesu mělo pohybovat, aby vznikla rovnoměrná vrstva fosfátu. V praxi je nejčastěji používán fosfát zinečnatý. Následuje oplach a neutralizační oplach.

Další fází je sycení fosfátové vrstvy mazivem. Nanášená vrstva vytvoří tenký film, který chrání činné části před přímým stykem s tvářeným kovem. Velmi podstatnou funkcí je ale snížení tření a zároveň i chlazení. To je nutné při výrobě na mechanických lisech, kde rychlosti tváření dosahují vyšších hodnot. Ve výrobě se pak nejčastěji využívají jako maziva ve vodě rozpustná mýdla, neemulgující minerální oleje s přísadami mastných kyselin a chemicky působících látek. Mohou být ale využity i živočišné a rostlinné tuky. K uvedeným mazivům může být dodán grafit, nebo sirník molybdeničitý. Celý proces nanášení je aplikován ponorem.

## 2.6 Nástroje pro objemové tváření [2], [11], [16], [21]

U technologie objemového tváření za studena musí nástroje odolávat vysokým tvářecím silám a rázům. Nejvíce namáhané části jsou pak v přímém kontaktu s polotovarem. Jsou to tedy průtláčnick, průtláčnice, pěchovník a pěchovnice, které tvoří hlavní prvky nástroje. Ty jsou vystaveny vysokým měrným tlakům. Musí tak být pevné, tvrdé, mít nízkou hodnotu drsnosti povrchu, vysokou ořezuvzdornost a minimální sklon k elastické deformaci. Velmi podstatná je i souosost, která může být zaručena vodíci stojánky, nebo vedením v průtláčnici.

Živostnost nástrojů zvyšuje správný technologický postup. Ten by se měl volit tak, aby byl optimální stupeň deformace v jednotlivých operacích. V případě vzniku hraničního napětí je lepší variantou rozdělit jednu operaci na vícero. Při konstrukci je tedy nutnost dodržet určité podmínky tak, aby zde byla zaručena hospodárnost a celková ekonomičnost.

Při volbě materiálu nástroje je nutno zohlednit zmíněné požadavky. Oceli pro tváření za studena musí mít vysokou jakost, kterou lze dosáhnout přidáním malého obsahu síry a fosforu. Tyto prvky musí být pečlivě dezoxidované. Dalšími velmi důležitými prvky pro zvýšení životnosti nástroje je molybden a kobalt. Ty by se měli vyskytovat v obsahu 5 %. Faktorem ovlivňující životnost je také tepelné zpracování. Nejčastěji se jedná o kalení, kterým se dosahuje vyšší tvrdosti a vzniku martenzitické struktury, po kterém následuje popouštění pro snížení vnitřního pnutí. Pro objemové tváření jsou z tohoto důvodu nejčastěji voleny nástrojové oceli třídy devatenáct s potřebným množstvím legur, nebo materiály ze slinutých karbidů. V tabulce 3 jsou uvedeny vhodné materiály pro výrobu nástrojů.

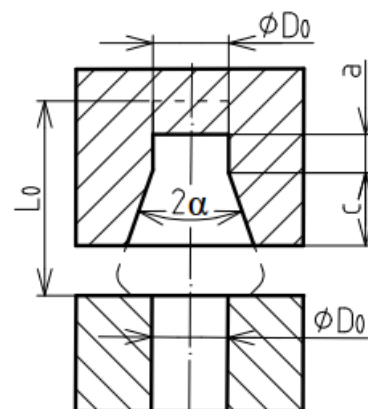
Tab. 3 Materiály vhodné pro nástroje [2]

Část nástroje	Materiál dle ČSN
Pěchovníky, průtláčnicky	19 423, 19 436, 19 437, 19 800, 19 810, 19 820, 19 824, 19 733
Pěchovnice, průtláčnice	19 191, 19 423, 19 436, 19 437, 19 614, 19 721, 19 733, 19 810, 19 824, 19 830
Vyhazovače	19 420, 19 436
Vodící pouzdra	19 423, 19 436
Podpěrné podložky, podpěrné kolíky	19 423, 19 436

### 2.6.1 Nástroje pro pēchování [2], [11], [16]

U nástrojů pro pēchování jsou nejdůležitější části funkční plochy, které jsou vystaveny největšímu namáhání. Hlavním faktorem ovlivňující geometrii pēchovníku a pēchovnice je správný technologický postup výroby. V tom je řešen především způsob použité technologie, tedy jedná se pouze o pēchování, nebo i o kombinaci více tvářecích operací. Značný podíl na správných rozměrech nástroje má i volba stroje.

- **Pēchovník** – Pozornost při návrhu pēchovníku je vztažena především k funkčním plochám a dutinám, které udávají rozměry součástí. Doporučené rozměry průtlačníku pro pēchování hlavy šroubů jsou uvedeny v tabulce 4. Na obrázku 20 je pak vyobrazen průtlačník s obecnými kótami pro zmíněnou tabulku. Pēchovníky lze dále rozdělit z pohledu konstrukčního hlediska na pevný, s odpruženým trnem, nebo celkově odpružený.

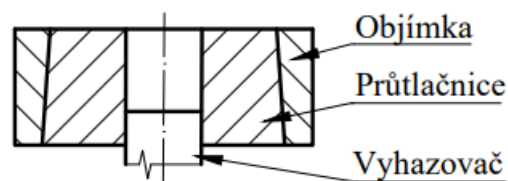


Obr. 20 Rozměry pēchovníku [11]

Tab. 4 Doporučené rozměry pēchovníku [11]

$L_0/D_0$	$2\alpha$ [°]	$a$ [mm]	$c$ [mm]
2,5	15	$0,6 \cdot D_0$	$1,37 \cdot D_0$
3,3	15	$1 \cdot D_0$	$1,56 \cdot D_0$
3,9	15	$1,4 \cdot D_0$	$1,66 \cdot D_0$
4,3	20	$1,7 \cdot D_0$	$1,56 \cdot D_0$
4,5	25	$1,9 \cdot D_0$	$1,45 \cdot D_0$

- **Pēchovnice** - Obdobně jako u průtlačnic jsou pēchovnice vystaveny vysokým měrným tlakům a rázům. Jejich tvar je velmi podobný jako průtlačnice pro zpětné protlačování viz obrázek 21. Funkční dutina má tedy totožnou geometrii jako tvar pēchovaného kusu.



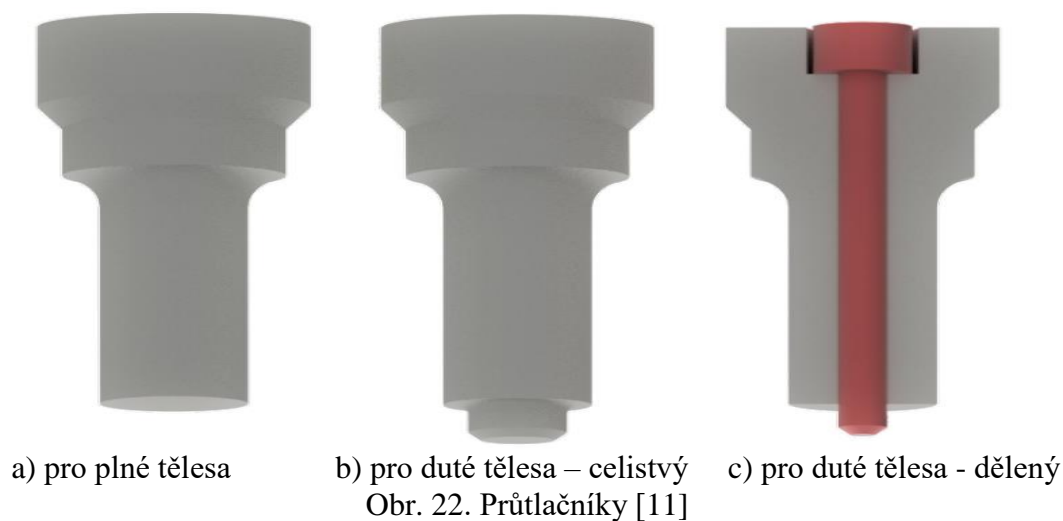
Obr. 21 Pēchovnice [11]

### 2.6.2 Nástroje pro protlačování [2], [11], [16]

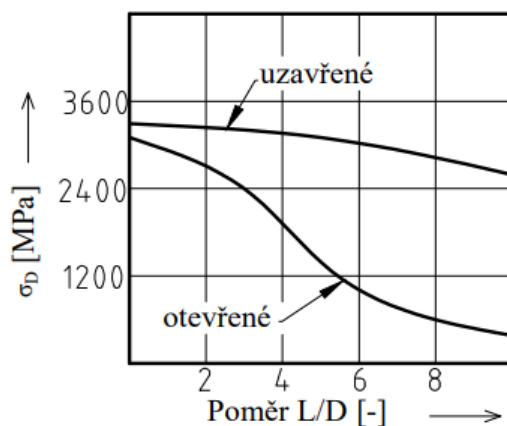
Obdobně jako u pēchovacích nástrojů je kladen důraz především na funkční plochy průtlačníku a průtlačnice, které jsou vystaveny největšímu namáhání.

- **Průtlačník** – Pro plná tělesa je nejčastěji vyrábějí z jednoho kusu, viz obrázek 22a. Mohou se lišit upínací hlavou, ta může být válcová, nebo kuželová. Pēchod mezi dríkem a upínací částí musí být pozvolný. Pokud není, dochází ke koncentraci napětí a k snižování životnosti. Pro protlačování dutých součástí je výhodnější použít skládaný nástroj, který je vyobrazen na obrázku 22c. V případě použití celistvého nástroje (obr. 22b) je velká pravděpodobnost vzniku porušení u pēchodu z velkého na malý průměr. Velmi důležitým požadavkem pro výrobu je tolerance kolmosti, rovnoběžnosti a házivosti. Maximální délka funkční části by neměla přesahovat trojnásobek průměr průtlačníku. Důraz se musí klást i na dokončovací operace. Jedná se o broušení a lapování funkčních ploch. Čím jemnější povrch bude vyhotoven, tím bude nižší tření.



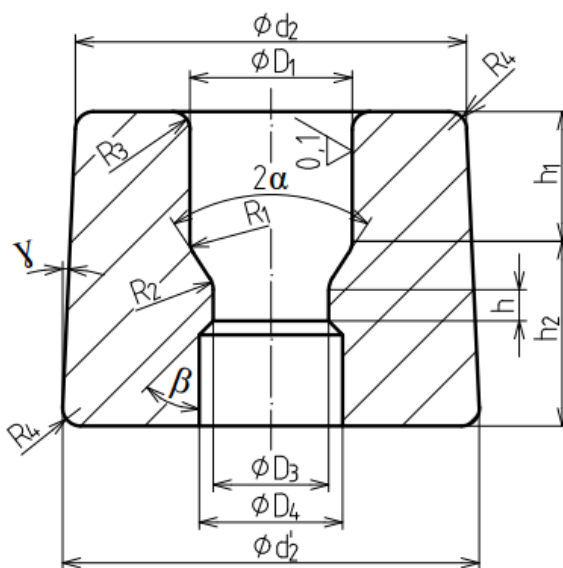


Pevnostní návrh funkční části průtlačníku vychází z deformačního odporu vyjádřeným opačnou hodnotou měrného tlaku na čele průtlačníku a z radiálního zatížení funkční plochy průtlačnice. Poruchám prostým přetížením je možno zabránit volbou správné geometrické konstrukce a materiálu. Dle způsobu upnutí a štíhlosti průtlačníku je nutno kontrolovat jej na vzpěrnou stabilitu, například dle Eulera viz obrázek 23, kde jsou křivky pro ocel 19 824. Nejvhodnější řešení je dopředné protlačování uzavřené a to z důvodu nejmenšího namáhání na vzpěr. V případě dodržení podmínky, kde poměr délky k průměru nepřesahuje hodnotu tři. Je možné dimenzovat průtlačník pouze na prostý tlak, za předpokladu že není namáhán i na ohyb.



Obr. 23 Ztráta stability nástroje [11]

**Průtlačnice** - jednou z nejdůležitějších a nejvíce namáhanou součástí protlačovacího nástroje je průtlačnice. Při konstrukci je tedy nutno dbát na rozměry a tvary funkčních částí. Velkou roli ale hraje i celkové provedení a následné uložení. Nejdůležitějším geometrickým parametrem u průtlačnice v technologii dopředného protlačování je redukční část viz obrázek 25. Nejčastěji používaný tvar je kužel, který není složitý na výrobu. Úhel tohoto kužele má velmi podstatný vliv na deformační odpor. V zaváděcí části jsou pak rádiusy ulehčující vkládání polotovaru. Osvědčený tvar průtlačnice je znázorněn na obrázku 24. Doporučené rozměry jsou uvedeny v tabulce 5.

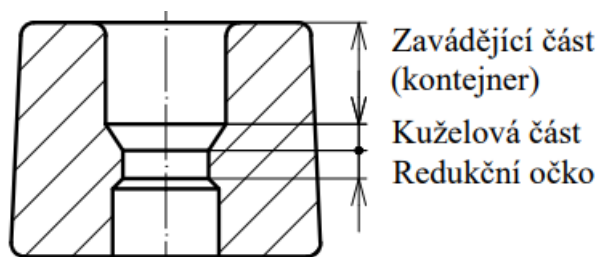


Obr. 24 Průtlačnice [11]

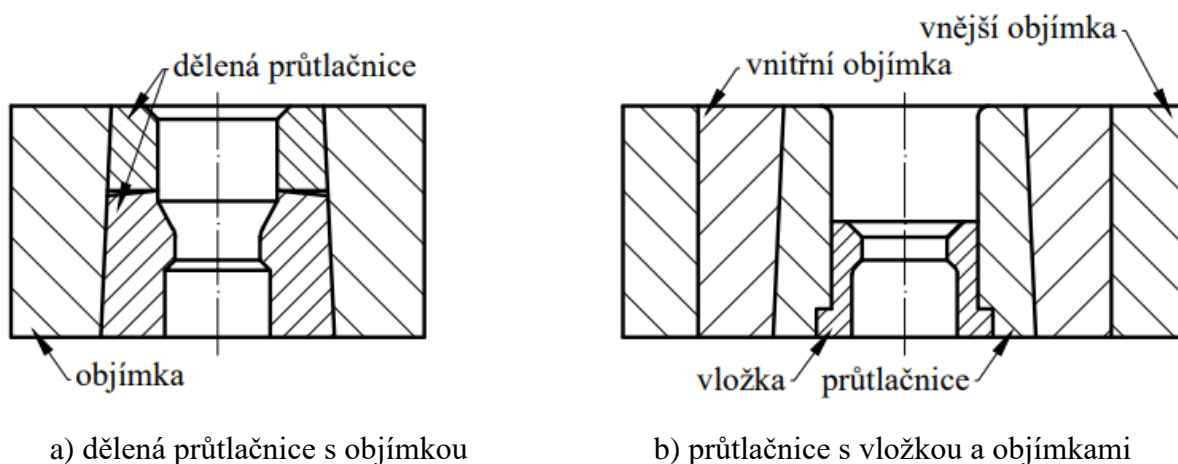
Tab. 5 Doporučené rozměry průtlačnice [11]

Teplota tváření	20 °C	200 °C – 400 °C	400 °C – 700 °C	700 a více °C
$D_4$	$D_3 + (0,1 - 0,2)$	$D_3 + (0,2 - 0,4)$	$D_3 + (0,4 - 0,6)$	$D_3 + (0,4 - 0,2)$
$h$	$0,5 \cdot \sqrt{D_3}$	2 – 3 mm	3 – 5 mm	5 – 20 mm
$2\alpha$	30° – 90°	60° – 120°	90° – 120°	90° – 150°
$R_1$	$(D_1 - D_3)/2$			
$R_2$	$(0,05 - 0,1) \cdot D_3$	1 – 2 mm	2 – 4 mm	3 – 10 mm
$R_3$	$0,15 \cdot D_1$			
$H_2$	$\min 0,7 \cdot D_1$			
$\gamma$	1° – 2°			
$\beta$	5° – 10°			

Průtlačnice pro dopředné protlačování jsou silně namáhány na radiální tlak. Ten se dá chápat jako tlak hydrostatický. To znamená, že nejvíce síly působí na obvod a namáhá průtlačnici na tah. Konstrukce tedy musí být masivní, nebo musí být využita objímka, která je znázorněna na obrázku 26a. Při použití jedné objímky je obecně možno použít radiální tlaky v hodnotě 1600 MPa. U využití dvou objímek lze použít tlak 2000 MPa. V případě využití objímek je možnost použít i vložku viz obrázek 26b, která je zalisovaná s přesahem. Naskytne se tady pak výhoda, kdy v případě opotřebení stačí vyměnit vložku a výroba může pokračovat. Další možnost výroby průtlačnice je seskládání ze tří částí. Konkrétně pak z válcového zásobníku, kuželové části a redukčního očka. Často ale dochází k problému, že se jedna část protlačí druhou. Tento problém lze vyřešit použitím vyhazovače, který jednotlivý výrobek odstraní.



Obr. 25 Části průtlačnice [11]



a) dělená průtlačnice s objímkou

b) průtlačnice s vložkou a objímkami

Obr. 26 Dělené průtlačnice [11]

## 2.7 Protlačovací stroje [2], [11], [13], [14]

Pro technologii dopředního protlačování se nejčastěji používají lisy, popřípadě speciální tvářecí stroje. Obecně je nutnost pro volený stroj, aby vykonaná síla nepřesáhla jmenovitou sílu. Pokud dojde k překročení, tak dochází k přetížení a možné poruše. Za pomoci vypočtené práce je možno ověřit zatížení pohonu. Mezi další ukazatele pro volbu vhodného stroje jsou tuhost, zdvih a rychlost beranu. Obecně jde pro protlačování použít tři druhy strojů. Konkrétně se jedná o hydraulické lisy, mechanické klikové lisy a v neposlední řadě speciální stroje.

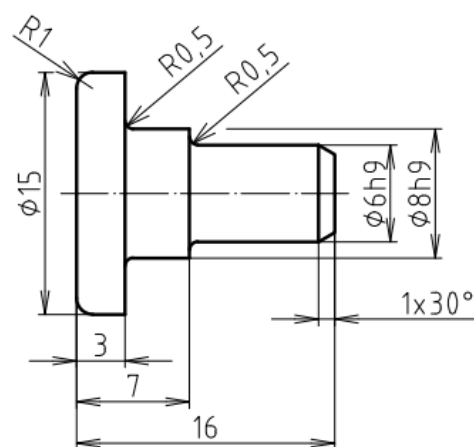
- Hydraulické lisy – jsou vhodné především pro rozměrné a hlavně dlouhé výrobky. Není zde problém dosažení vysokých tvářecích sil téměř po celé pracovní dráze. Další výhodou je vysoká rychlost přiblížení k obrobku, ale nízká rychlost při dosedání na čelo polotovaru. Nedochozí tak ke zbytečnému přetěžování nástroje a jeho životnost je tedy větší. Nevýhodou poté může být menší počet zdvihů a malá pracovní rychlost, na které závisí plynulý tok materiálu. Na hydraulický lisech se nesmí pracovat v hořlavém prostředí, nebo s polotovary dosahujícími vysokých teplot. Je zde riziko, že provozní kapalina se může vznítit a mohlo by dojít k havárii.
- Mechanické klikové lisy – dosahují poměrně nízkých zdvihů, ale za to dostatečně vysokých tvářecích rychlostí. Při volbě klikového lisu můžeme počítat se zatížením stroje na maximálně 30 až 50 % jmenovité síly. Je to zapříčiněno natočením kliky, která je využitelná pouze do 30 °. Obecně bývá pohyb elektromotoru převáděn na beran přes ozubená kola a klikovou hřídel. Konstrukce bývá dvoutoťanová pro vyšší tuhost. V případě využití vyhazovače jsou pohyby synchronizovány s pohybem beranu, aby byl výrobní čas kratší. Tyto lisy jsou často používány jako postupové automaty.
- Speciální stroje – v dnešní době nejrozšířenější možnost výroby. Jedná se o postupové automaty, viz obrázek 27. Tam v průběhu několika operací dochází k zhotovení celého výrobku. Přenos součástí mezi jednotlivými částmi výroby v automatu je zaručen za pomoci kleštin. Polotovar je ve formě drátu, který si sám automat dělí a podává dále.



Obr. 27 Víceoperační automat Hatebur [26]

### 3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY [1], [17], [23]

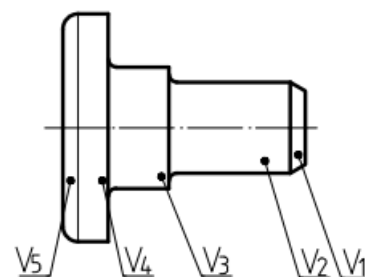
Řešenou součástí je rotačně symetrický čep. Jak již bylo výše zmíněno, pro výrobu součásti byla zvolena technologie dopředného protlačování v kombinaci s pěchováním. Čep se skládá z hlavy a dvou dřiků viz obrázek 28. Největší průměr dosahuje 15 mm a celková délka vyráběné součásti je 16 mm. Tolerované rozměry jsou  $\varnothing 6h9$  a  $\varnothing 8h9$ , ostatní rozměry jsou určeny v toleranci ISO 2786-mK. Pro výrobu byl volen materiál 11 320-5R, který splňuje požadavky na mechanické vlastnosti a zároveň je vhodný pro objemové tváření za studena. Pro návrh výroby je stěžejní určení objemu polotovaru a následné stanovení optimálního počtu tvářecích operací, jež bude provedeno dále.



Obr. 28 Rozměry čepu

#### 3.1 Výpočet objemu a hmotnosti [2], [23], [27]

Pro výpočet celkového objemu součásti je zapotřebí rozdělit čep na jednodušší části, jak je znázorněno na obrázku 29. Z nich jsou poté pomocí jednoduchých matematických vzorců vypočteny dílčí objemy. Ze součtu jednotlivých segmentů poté vzejde celkový objem. Pro ověření správnosti budou výsledky porovnávány s vymodelovanou součástí v programu Autodesk Inventor Professional 2019.



Obr. 29 Rozdělení objemů

##### Výpočet objemu $V_1$ :

$$V_1 = \frac{\pi \cdot h}{3} \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2) = \frac{\pi \cdot 1}{3} \cdot (2,4225^2 + 2,4225 \cdot 3 + 3^2) \quad (3.1)$$

$$V_1 = 23,181 \text{ mm}^3$$

##### Výpočet objemu $V_2$ :

Při výpočtu je zanedbán rádius R 0,5.

$$V_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} \cdot 8 = 226,195 \text{ mm}^3 \quad (3.2)$$

##### Výpočet objemu $V_3$ :

Při výpočtu je zanedbán rádius R 0,5.

$$V_3 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h = \frac{\pi \cdot 8^2}{4} \cdot 4 = 201,062 \text{ mm}^3$$

##### Výpočet objemu $V_4$ :

$$V_4 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h = \frac{\pi \cdot 15^2}{4} \cdot 2 = 353,429 \text{ mm}^3$$

### Výpočet objemu $V_5$ :

$$V_5 = \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h \right) + \frac{\pi^2 \cdot R \cdot r^2}{2} = \left( \frac{\pi \cdot 13^2}{4} \cdot 1 \right) + \frac{\pi^2 \cdot 6,5 \cdot 1^2}{2}$$
$$V_5 = 164,808 \text{ mm}^3 \quad (3.3)$$

### Výpočet celkového objemu součástí:

$$V_C = \sum V_i = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 \quad (3.4)$$
$$V_C = 23,181 + 226,195 + 201,062 + 353,429 + 164,808$$
$$V_C = 968,675 \text{ mm}^3$$

kde:  $V_C$  – celkový objem součástí [ $\text{mm}^3$ ],  
 $V_i$  – objem jednotlivých částí [ $\text{mm}^3$ ].

### Výpočet celkového objemu pomocí Autodesk Inventor:

$$V_C = 973,461 \text{ mm}^3$$

Rozdíl vypočteného objemu od objemu odečteného činní 4,786  $\text{mm}^3$ . Tento rozdíl je nejspíše způsoben zanedbáním dvou rádiusů při výpočtu segmentu  $V_2$  a  $V_3$ . Pro další výpočty bude využit přesnější objem, který byl stanoven programem Autodesk Inventor Professional 2019.

### Výpočet hmotnosti:

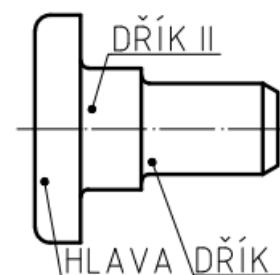
Pro výrobu čepu byla volena ocel 11 320-5R. Hustota této oceli je  $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Vzorec pro výpočet hmotnosti čepu je stanoven dle rovnice (3.5).

$$m_s = V_C \cdot \rho = 973,461 \cdot 7850 \cdot 10^{-9} = 0,00764 \text{ kg} = 7,64 \text{ g} \quad (3.5)$$

kde:  $m_s$  – hmotnost [kg],  
 $\rho$  – hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

## 3.2 Výrobní varianty [2], [11], [13], [14], [28]

Součást je možno vyrábět několika různými způsoby. Při volbě nejvhodnější možné varianty je nutné zohlednit posloupnost výroby, i velikost deformace v určitých částech čepu viz obrázek 30. Deformace by měla být v celém průřezu rovnoměrná. Dalším faktorem je počet operací. Ten je z ekonomického hlediska nevýhodnější, když je co nejmenší počet operací. Nemůže však být upřednostňován před správnou technologií. Vzhledem k předběžnému výběru protlačovacího automatu je voleno pět operací včetně stříhu.

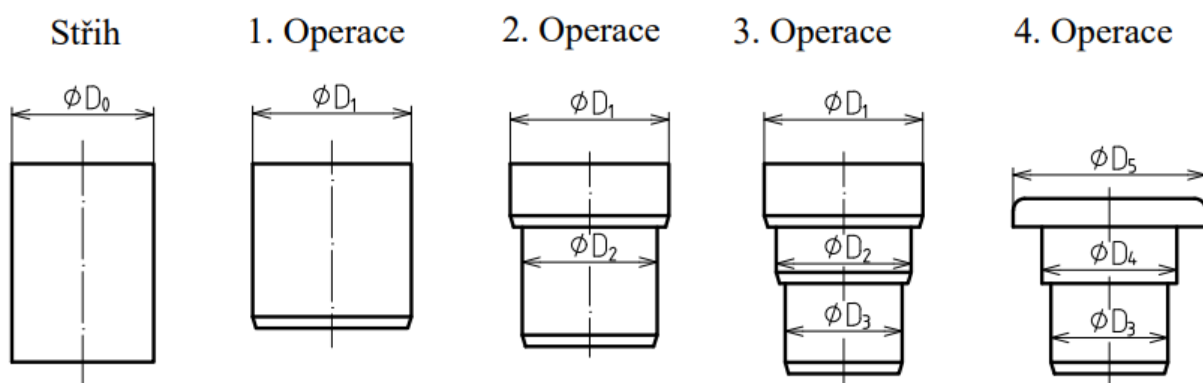


Obr. 30 Rozdělení čepu

### 3.2.1 Varianta A [2], [11], [13], [14], [28]

Pro návrh první varianty je použita optimalizace přetvoření, kde ve všech částech čepu je teoreticky stejné přetvoření. Operace výroby jsou vyobrazeny na obrázku 31. Výrobní postup bude následující:

- stříh,
- 1. operace – předpěchování (srovnání čel),
- 2. operace – dopředné protlačování (II část dříku),
- 3. operace – dopředné protlačování (I část dříku),
- 4. operace – pěchování (hlava čepu, dřík II).



Obr. 31 Varianta A

U výpočtu rovnoměrnosti zpevnění v celé součásti je použita již zmíněná optimalizace viz rovnice (3.6).

$$\varphi_{P\check{e}.H1} = \varphi_{Pr.D2} + \varphi_{P\check{e}.D2} = \varphi_{Pr.D1} \quad (3.6)$$

kde:  $\varphi_{P\check{e}.H1}$  – logaritmické přetvoření hlavy při pěchování [-],  
 $\varphi_{Pr.D2}$  – logaritmické přetvoření dříku II při protlačování [-],  
 $\varphi_{P\check{e}.D2}$  – logaritmické přetvoření dříku II při pěchování [-],  
 $\varphi_{Pr.D1}$  – logaritmické přetvoření díku I při protlačování [-]

Po dosazení rozměrových charakteristik podle obrázku 31 do rovnice (3.6) bude mít rovnice výsledný tvar (3.7).

$$\ln \frac{D_5^2}{D_1^2} = \ln \frac{D_1^2}{D_2^2} + \ln \frac{D_4^2}{D_2^2} = \ln \frac{D_1^2}{D_3^2} \quad (3.7)$$

Následně po odlogaritmování a matematických úpravách rovnice (3.7) vypočteme průměry  $D_1$  a  $D_2$ .

$$D_1 = \sqrt[4]{D_5^2 \cdot D_3^2} = \sqrt[4]{15^2 \cdot 6^2} = 9,48 \text{ mm} \quad (3.8)$$

$$D_2 = \sqrt[4]{\frac{D_1^4 \cdot D_4^2}{D_5^2}} = \sqrt[4]{\frac{9,48^4 \cdot 8^2}{15^2}} = 6,92 \text{ mm} \quad (3.9)$$

V druhé operaci dochází k zarovnání čel na průměr  $D_1$  a to konkrétně na 9,48 mm. Z tohoto důvodu je volen polotovár, který je schopen se do tohoto rozměru přetvořit. Dle normy ČSN 42 6410 se jedná o průměr,  $D_0 = 8$  mm. Logaritmické deformace v jednotlivých operacích se vypočte podle výše zmíněných vzorců (2.1, 2.12).

$$\varphi_1 = \varphi_{P\check{e}} = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{9,48^2}{8^2} = 0,339$$

$$\varphi_2 = \varphi_{PrDII} = \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} = \ln \frac{6,92^2}{9,48^2} = -0,629$$

$$\varphi_3 = \varphi_{PrDI} = \ln \frac{D_3^2}{D_2^2} = \ln \frac{6^2}{6,92^2} = -0,285$$

$$\varphi_4 = \varphi_{P\check{e}DII} = \ln \frac{D_4^2}{D_2^2} = \ln \frac{8^2}{6,92^2} = 0,290$$



$$\varphi_5 = \varphi_{P\check{e}HI} = \ln \frac{D_5^2}{D_1^2} = \ln \frac{15^2}{9,48^2} = 0,918$$

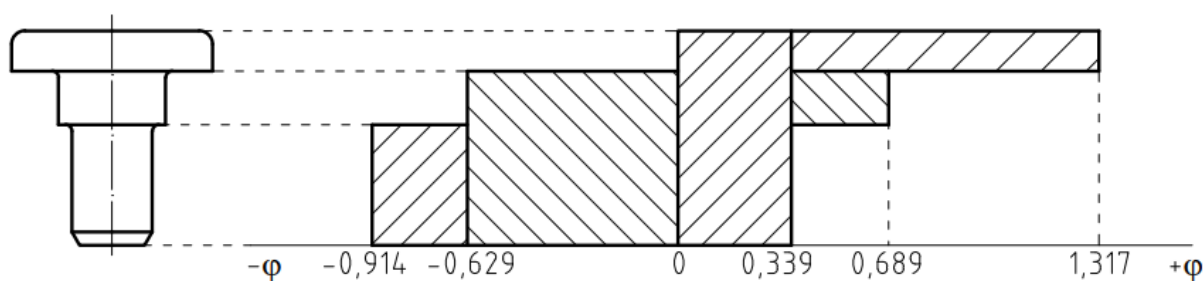
Pro výpočet celkového přetvoření v určitých částech čepu je nutno sečíst hodnoty, které působí pouze v dané části. Tyto výpočty jsou uvedeny níže:

$$\varphi_{Hlava} = |\varphi_1| + |\varphi_5| = 0,339 + 0,918 = 1,257 \quad (3.10)$$

$$\varphi_{DříkII} = |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_4| = 0,339 + 0,629 + 0,290 = 1,258 \quad (3.11)$$

$$\varphi_{DříkI} = |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_3| = 0,339 + 0,629 + 0,285 = 1,258 \quad (3.12)$$

Logaritmická deformace pro celou vyráběnou součást dle varianty A je vyobrazena na obrázku 32. Z obrázku je patrné, že k největšímu přetvoření dochází u hlavy čepu. To je způsobeno v poslední operaci, kde dochází k finálnímu pěchování.

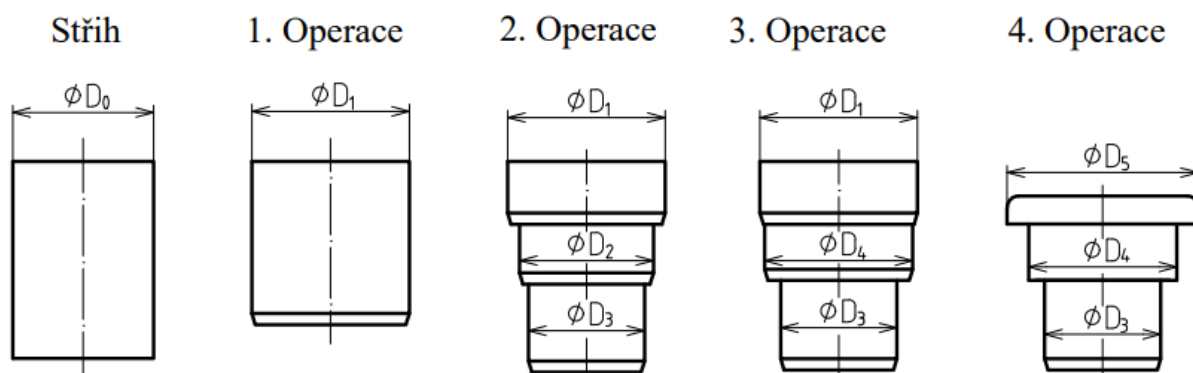


Obr. 32 Přetvoření varianta A

### 3.2.2 Varianta B [2], [11], [13], [14], [28]

Pro návrh druhé varianty je taktéž použita optimalizace geometrických charakteristik. Posloupnost operací viz obrázek 33. Výrobní postup bude následující:

- stříh,
- 1. operace – předpěchování (srovnání čel),
- 2. operace – dopředné protlačování (I a II části dříku),
- 3. operace – pěchování (II část dříku),
- 4. operace – pěchování (hlava).



Obr. 33 Varianta B

Logaritmické deformace v jednotlivých operacích pro variantu B:

$$\varphi_1 = \varphi_{P\check{e}} = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{9,48^2}{8^2} = 0,339$$

$$\varphi_2 = \varphi_{PrDI} = \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} = \ln \frac{6,92^2}{9,48^2} = -0,629$$

$$\varphi_3 = \varphi_{PrDI} = \ln \frac{D_3^2}{D_1^2} = \ln \frac{6^2}{9,48^2} = -0,915$$

$$\varphi_4 = \varphi_{P\check{e}DI} = \ln \frac{D_4^2}{D_2^2} = \ln \frac{8^2}{6,92^2} = 0,290$$

$$\varphi_5 = \varphi_{P\check{e}HI} = \ln \frac{D_5^2}{D_1^2} = \ln \frac{15^2}{9,48^2} = 0,918$$

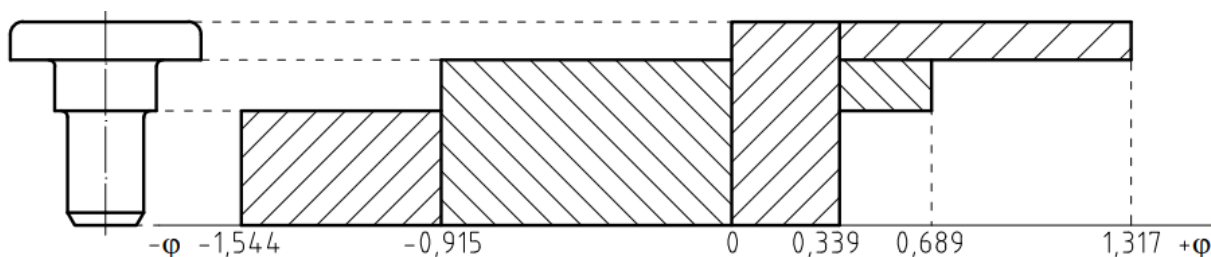
Obdobně jako u varianty A se zde vypočte přetvoření pro dřík I, dřík II a hlavu čepu:

$$\varphi_{Hlava} = |\varphi_1| + |\varphi_5| = 0,339 + 0,918 = 1,257$$

$$\varphi_{D\check{r}\acute{ı}kII} = |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_4| = 0,339 + 0,629 + 0,290 = 1,258$$

$$\varphi_{D\check{r}\acute{ı}kI} = |\varphi_1| + |\varphi_3| = 0,339 + 0,915 = 1,254$$

Pro variantu B je logaritmické přetvoření znázorněno na obrázku 34. Na rozdíl od varianty A, kde největšího přetvoření je dosaženo u hlavy. Tak zde je u dříku I, kde dosahuje hodnoty  $\varphi = -1,544$ .



Obr. 34 Varianta B

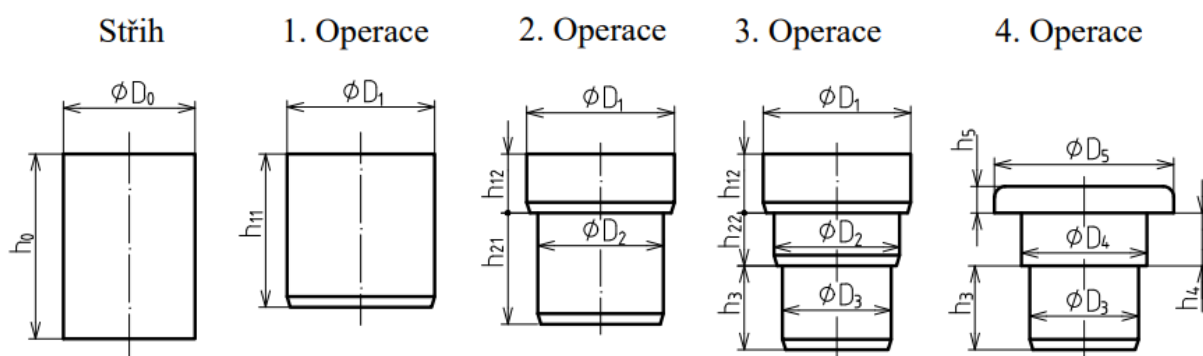
### 3.2.3 Zhodnocení variant

Při návrhu každé ze zmíněných varianty bylo předběžně počítáno s využitím protlačovacího automatu. Ten je přizpůsobený na pět výrobních operací, včetně odstříhnutí. Jako polotovary byl v obou případech volen drát o průměru Ø8h9, který bude stříhat jednotlivé polotovary v délce  $h = 19,37$  mm. Taktéž bylo v obou možnostech využito optimalizace logaritmického přetvoření tak, aby bylo v celém průřezu rozloženo co nejrovnoměrněji. Pro volbu vhodnějšího postupu výroby je tedy vycházeno z velikosti přetvoření. Ve variantě A i B jsou hodnoty pro hlavu a dřík II totožné. Rozdíl nastává až u dříku I, kde ve volbě B je deformace větší. Z tohoto hlediska je pro další práci volen technologický postup dle varianty A.

## 3.3 Stanovení výšek pro variantu A [27]

Pro výpočet výšky v jednotlivých operacích (viz obrázek 35) bude vycházeno ze zákona zachování objemu, který je v celém průběhu tváření neměnný. Po matematické úpravě lze získat potřebná výška.





Obr. 35 Výšky varianty A

- **Střih**

$$h_0 = \frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot D_0^2} = \frac{4 \cdot 973,461}{\pi \cdot 8^2} = 19,37 \text{ mm}$$

- **1. operace**

$$h_{11} = \frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4 \cdot 973,461}{\pi \cdot 9,48^2} = 13,79 \text{ mm}$$

- **2. operace**

$$h_{12} = \frac{4 \cdot (V_4 + V_5)}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4 \cdot (353,429 + 164,808)}{\pi \cdot 9,48^2} = 7,34 \text{ mm}$$

$$h_{21} = \frac{4 \cdot (V_1 + V_2 + V_3)}{\pi \cdot D_2^2} = \frac{4 \cdot (23,181 + 226,195 + 201,062)}{\pi \cdot 6,92^2}$$

$$h_{21} = 11,97 \text{ mm}$$

- **3. operace**

$$h_{22} = \frac{4 \cdot V_3}{\pi \cdot D_2^2} = \frac{4 \cdot 201,062}{\pi \cdot 6,92^2} = 5,35 \text{ mm}$$

$$h_3 = \frac{4 \cdot (V_2 + V_1)}{\pi \cdot D_3^2} = \frac{4 \cdot (226,195 + 23,181)}{\pi \cdot 6^2} = 8,82 \text{ mm}$$

- **4. operace** - V průběhu čtvrté operace dochází k napěchování hlavy na  $h_5 = 3 \text{ mm}$  a dřívku II na  $h_4 = 4 \text{ mm}$ , což jsou finální rozměry vyráběné součásti.

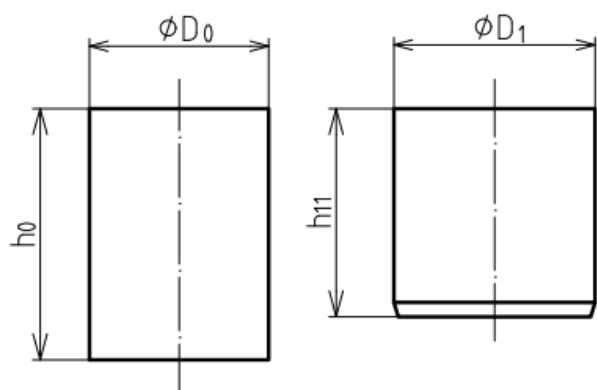
### 3.4 Určení rychlostí deformace pro variantu A [2], [11], [13], [14], [17]

Při výpočtu rychlosti deformace je, podstatné zjistit, jakou rychlostí se bude pohybovat tvářecí nástroj. Tyto hodnoty jsou poté dosazeny do vztahu podle Johnson-Cooka, který počítá i s vlivem rychlosti deformace. Pro zmíněné výpočty budou použity vzorce (2.3,2.4, 2.15).

- **Rychlost pohybu nástroje**

$$v_0 = \frac{n_{zdvih} \cdot 2 \cdot h_{beranu}}{t \cdot 10^3} = \frac{160 \cdot 2 \cdot 78}{60 \cdot 10^3} = 0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **1. operace** – přechování (zarovnání čel)

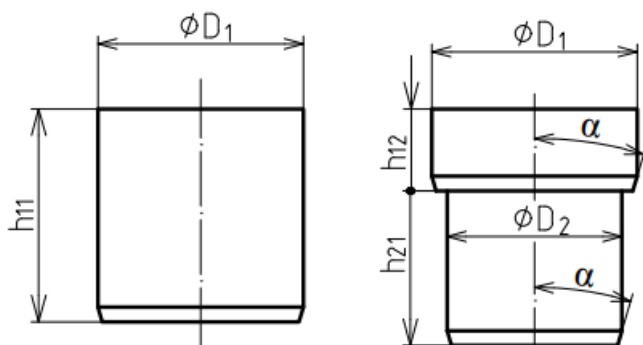


$$\begin{aligned}\phi D_0 &= 8 \text{ mm} \\ \phi D_1 &= 9,48 \text{ mm} \\ h_0 &= 19,37 \text{ mm} \\ h_{11} &= 13,79 \text{ mm} \\ v_0 &= 0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\end{aligned}$$

Obr. 36 1. Operace

$$\dot{\phi}_1 = \frac{v_0}{h_{11}} = \frac{0,42}{0,01379} = 30,46 \text{ s}^{-1}$$

- **2. operace** – dopředné protlačování (II část dříku)

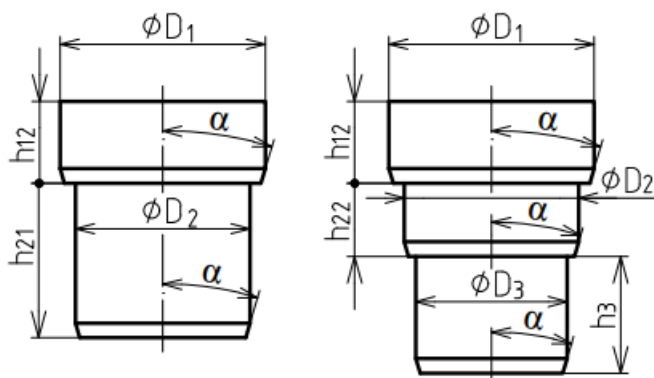


$$\begin{aligned}\phi D_1 &= 9,48 \text{ mm} \\ \phi D_2 &= 6,92 \text{ mm} \\ h_{11} &= 13,79 \text{ mm} \\ h_{12} &= 7,34 \text{ mm} \\ h_{21} &= 11,97 \text{ mm} \\ v_0 &= 0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \\ \alpha &= 15^\circ\end{aligned}$$

Obr. 37 2. Operace

$$\dot{\phi}_2 = 2 \cdot v_0 \cdot \frac{R_1^2}{R_2^3} \cdot \tan \alpha = 2 \cdot 0,42 \cdot \frac{0,00474^2}{0,00346^3} \cdot \tan 15^\circ = 122,08 \text{ s}^{-1}$$

- **3. operace** – dopředné protlačování (I část dříku)

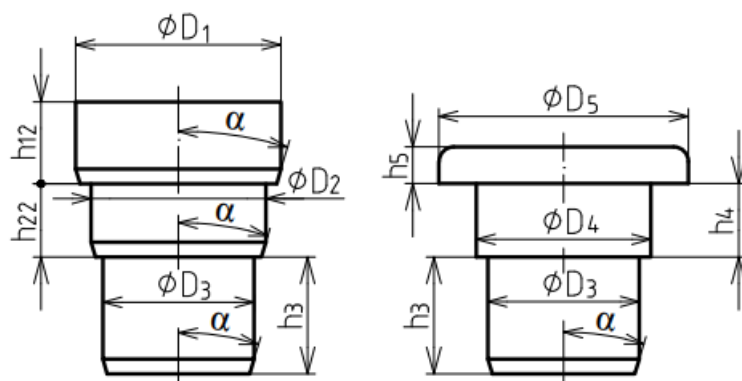


$$\begin{aligned}\phi D_1 &= 9,48 \text{ mm} \\ \phi D_2 &= 6,92 \text{ mm} \\ h_{12} &= 7,34 \text{ mm} \\ h_{21} &= 11,97 \text{ mm} \\ h_{22} &= 13,79 \text{ mm} \\ h_3 &= 8,82 \text{ mm} \\ v_0 &= 0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \\ \alpha &= 15^\circ\end{aligned}$$

Obr. 38 3. Operace

$$\dot{\phi}_3 = 2 \cdot v_0 \cdot \frac{R_2^2}{R_3^3} \cdot \tan \alpha = 2 \cdot 0,42 \cdot \frac{0,00346^2}{0,003^3} \cdot \tan 15^\circ = 99,89 \text{ s}^{-1}$$

- **4. operace** – pēchování (hlava čepu, II část dříku)



$\varnothing D_1 = 9,48 \text{ mm}$   
 $\varnothing D_2 = 6,92 \text{ mm}$   
 $\varnothing D_3 = 6 \text{ mm}$   
 $\varnothing D_4 = 8 \text{ mm}$   
 $\varnothing D_5 = 15 \text{ mm}$   
 $h_{12} = 7,34 \text{ mm}$   
 $h_{22} = 13,79 \text{ mm}$   
 $h_3 = 8,82 \text{ mm}$   
 $h_4 = 4 \text{ mm}$   
 $h_5 = 3 \text{ mm}$   
 $v_o = 0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 $\alpha = 15^\circ$

Obr. 39 4. Operace

$$\dot{\phi}_{4D} = \frac{v_o}{h_4} = \frac{0,42}{0,004} = 105 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\phi}_{4H} = \frac{v_o}{h_5} = \frac{0,42}{0,003} = 140 \text{ s}^{-1}$$

### 3.5 Určení síly a práce v 1. operaci [1], [2], [6], [11], [13], [14], [17]

V první operaci dochází k předpēchování výstřižku, za účelem zarovnání čel.

- **Přirozený přetvárný odpor** - výpočet určuje základní deformační odpor působící proti vnějším silám při jednoosé tlakové napjatosti. Pro výpočet bude využit dynamický model Johnson-Cooka (2.5), kde potřebné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6. Tyto hodnoty jsou totožné s hodnotami v následujících operacích a bude jich tak dále využito. Dále také bude zapotřebí vztahu (2.3). Konkrétně pro první a čtvrtou operaci, kde dochází k pēchování. Pro určení rychlosti deformace ve druhé a třetí operaci bude použit vztah (2.16).

Tab. 6 Johnson-Cook hodnoty [6]

$\sigma_o$ [MPa]	B [-]	C [-]	n [-]	m [-]	T [K]	$T_o$ [K]	$T_m$ [K]
450	350	0,055	0,18	0,7	296,15	293,15	1773,15

Vypočtené hodnoty:

$$\sigma_{p1} = (\sigma_o + B \cdot \phi_1^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\phi}_1}{\dot{\phi}_o}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_o}{T_m - T_o} \right)^m \right]$$

$$\sigma_{p1} = (450 + 350 \cdot 0,339^{0,18}) \cdot \left( 1 + 0,055 \cdot \ln \frac{30,46}{1} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{296,15 - 293,15}{1773,15 - 293,15} \right)^{0,7} \right]$$

$$\sigma_{p1} = 865,34 \text{ MPa}$$

- **Deformační odpor** – tzv. technologický přetvárný odpor zahrnující vliv pasivních účinků vzniklých změnou tvaru tvářeného tělesa. Pro pēchování bude použit vzorec podle Siebela (2.6). Pro dopředné protlačování bude vycházeno z rovnice dle Feldmana (2.17). Tento vztah pro úplnost využívá úhel kužele v obloukové míře a střední hodnotu přirozeného přetvárného odporu. Tyto dvě hodnoty lze vypočítat dle vztahů (2.18, 2.19). Jako další parametr je nutno dosadit součinitel tření, který bude pro objemové tváření ve všech operacích roven  $f=0,05$ .

$$\sigma_{D1} = \sigma_{p1} \cdot \left( 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_1}{h_{11}} \right) = 865,34 \cdot \left( 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,05 \cdot 9,48}{13,79} \right) = 875,25 \text{ MPa}$$

- **Přetvárná práce** – pro výpočet přetvárné práce je již jisté, že bude vycházeno z přetvárného odporu a jejich středních hodnot. K výpočtu budou využity vzorce (2.9, 2.10).

$$A_{j1} = \frac{\sigma_0 + \sigma_{p1}}{2} \cdot \varphi_1 \cdot 10^{-3} = \frac{450 + 876,14}{2} \cdot 0,339 \cdot 10^{-3} = 0,22 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$$

$$A_1 = A_{j1} \cdot V_c = 0,22 \cdot 973,461 = 214,16 \text{ J}$$

- **Tvářecí síla** – nejpodstatnější hodnota pro následnou volbu tvářecího stroje. Pro výpočet bude použit vzorec (2.8), který vychází z deformačního odporu a plochy součásti v jednotlivých operacích.

$$F_1 = \sigma_{D1} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 875,25 \cdot \frac{\pi \cdot 9,48^2}{4} = 61778,69 \text{ N}$$

### 3.6 Určení síly a práce v 2. operaci [1], [2], [6], [11], [13], [14], [17]

V druhé operaci je tvořen dřík II dopředným protlačováním.

- **Přirozený přetvárný odpor:**

$$\varphi_{D2} = \varphi_{P\check{e}} + \varphi_{PrDI} = 0,339 + 0,629 = 0,968 \quad (3.13)$$

$$\sigma_{p2} = (\sigma_o + B \cdot \varphi_{D2}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_2}{\dot{\varphi}_o}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_o}{T_m - T_o} \right)^m \right]$$

$$\sigma_{p2} = (450 + 350 \cdot 0,968^{0,18}) \cdot \left( 1 + 0,055 \cdot \ln \frac{122,08}{1} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{296,15 - 293,15}{1773,15 - 293,15} \right)^{0,7} \right]$$

$$\sigma_{p2} = 995,68 \text{ MPa}$$

- **Deformační odpor:**

$$\hat{\alpha} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha}{180} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 15}{180} = 0,524 \text{ rad}$$

$$\sigma_{ps2} = \frac{\sigma_{p1} + \sigma_{p2}}{2} = \frac{875,25 + 995,68}{2} = 935,47 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{D2} = \sigma_{ps2} \left[ \left( 1 + \frac{f}{\hat{\alpha}} \right) \ln \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] + 4f \frac{L_3}{D_2} \sigma_{ps2} + 4f \frac{L_1}{D_1} \sigma_{p1}$$

$$\sigma_{D2} = 935,47 \cdot \left[ \left( 1 + \frac{0,05}{0,524} \right) \cdot \ln \left( \frac{9,48}{6,92} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot 0,524 \right] + 4 \cdot 0,05 \cdot \frac{2}{6,92} \cdot 935,47 +$$

$$+ 4 \cdot 0,05 \cdot \frac{15}{9,48} \cdot 875,25 = 759,37 \text{ MPa}$$

- **Přetvárná práce:**

$$A_{j2} = \frac{\sigma_{p1} + \sigma_{p2}}{2} \cdot \varphi_2 \cdot 10^{-3} = \frac{876,14 + 1007,36}{2} \cdot 0,629 \cdot 10^{-3} = 0,59 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$$

$$A_2 = A_{j2} \cdot (V_1 + V_2 + V_2) = 0,59 \cdot (23,181 + 226,195 + 201,062) = 265,76 \text{ J}$$

- **Tvářecí síla:**

$$F_2 = \sigma_{D2} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 759,37 \cdot \frac{\pi \cdot 9,48^2}{4} = 53599,41 \text{ N}$$

### 3.7 Určení síly a práce v 3. operaci [1], [2], [6], [11], [13], [14], [17]

V průběhu třetí operace je tvořen dřík I dopředným protlačováním.

- **Přetvárný odpor v třetí operaci:**

$$\varphi_{D3} = \varphi_{P\check{e}} + \varphi_{PrDII} + \varphi_{PrDI} = 0,339 + 0,629 + 0,285 = 1,253 \quad (3.14)$$

$$\sigma_{p3} = (\sigma_o + B \cdot \varphi_{D3}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_3}{\dot{\varphi}_o}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_o}{T_m - T_o} \right)^m \right]$$

$$\sigma_{p3} = (450 + 350 \cdot 1,253^{0,18}) \cdot \left( 1 + 0,055 \cdot \ln \frac{99,79}{1} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{296,15 - 293,15}{1773,15 - 293,15} \right)^{0,7} \right]$$

$$\sigma_{p3} = 1018,35 \text{ MPa}$$

- **Deformační odpor:**

$$\sigma_{ps3} = \frac{\sigma_{p2} + \sigma_{p3}}{2} = \frac{995,68 + 1018,35}{2} = 1007,02 \text{ MP}$$

$$\sigma_{D3} = \sigma_{ps3} \left[ \left( 1 + \frac{f}{\hat{\alpha}} \right) \ln \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] + 4f \frac{L_3}{D_2} \sigma_{ps3} + 4f \frac{L_1}{D_1} \sigma_{p2}$$

$$\sigma_{D3} = 1007,02 \cdot \left[ \left( 1 + \frac{0,05}{0,524} \right) \cdot \ln \left( \frac{6,92}{6} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot 0,524 \right] + 4 \cdot 0,05 \cdot \frac{2}{6} \cdot 1007,02 +$$

$$+ 4 \cdot 0,05 \cdot \frac{15}{6,92} \cdot 995,68 = 812,6 \text{ MPa}$$

- **Přetvárná práce:**

$$A_{j3} = \frac{\sigma_{p2} + \sigma_{p3}}{2} \cdot \varphi_3 \cdot 10^{-3} = \frac{995,68 + 1018,35}{2} \cdot 0,285 \cdot 10^{-3} = 0,29 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$$

$$A_3 = A_{j3} \cdot (V_1 + V_2) = 0,29 \cdot (23,181 + 226,195) = 72,32 \text{ J}$$

- **Tvářecí síla:**

$$F_3 = \sigma_{D3} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 812,6 \cdot \frac{\pi \cdot 9,48^2}{4} = 57356,6 \text{ N}$$

### 3.8 Určení síly a práce v 4. operaci [1], [2], [6], [11], [13], [14], [17]

Ve čtvrté operaci dochází k přechování dříku II a hlavy čepu do výsledné podoby.

- **Přetvárný odpor v čtvrté operaci:**

Dřík II:

$$\varphi_{D4D} = \varphi_{P\check{e}} + \varphi_{PrDII} + \varphi_{P\check{e}DII} = 0,339 + 0,629 + 0,918 = 1,886 \quad (3.15)$$

$$\sigma_{p4D} = (\sigma_o + B \cdot \varphi_{D4D}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{4D}}{\dot{\varphi}_o}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_o}{T_m - T_o} \right)^m \right]$$

$$\sigma_{p4D} = (450 + 350 \cdot 1,886^{0,18}) \cdot \left( 1 + 0,055 \cdot \ln \frac{105}{1} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{296,15 - 293,15}{1773,15 - 293,15} \right)^{0,7} \right]$$

$$\sigma_{p4D} = 1055,15 \text{ MPa}$$

Hlava:

$$\varphi_{D4H} = \varphi_{P\check{e}} + \varphi_{P\check{e}DII} = 0,339 + 0,918 = 1,257 \quad (3.16)$$

$$\sigma_{p4H} = (\sigma_o + B \cdot \varphi_{D4H}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{4H}}{\dot{\varphi}_o}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_o}{T_m - T_o} \right)^m \right]$$

$$\sigma_{p4H} = (450 + 350 \cdot 1,257^{0,18}) \cdot \left( 1 + 0,055 \cdot \ln \frac{140}{1} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{296,15 - 293,15}{1773,15 - 293,15} \right)^{0,7} \right]$$

$$\sigma_{p4H} = 1022,64 \text{ MPa}$$

- **Deformační odpor:**

Dřík II:

$$\sigma_{D4D} = \sigma_{P4D} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_4}{h_4 + h_{12}}\right) = 1055,15 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,05 \cdot 8}{4 + 7,34}\right) = 1067,56 \text{ MPa}$$

Hlava:

$$\sigma_{D4H} = \sigma_{P4H} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_5}{h_3}\right) = 1022,64 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,05 \cdot 15}{3}\right) = 1107,86 \text{ MPa}$$

- **Přetvárná práce:**

Dřík II:

$$A_{j4D} = \frac{\sigma_{p2} + \sigma_{p4D}}{2} \cdot \varphi_1 \cdot 10^{-3} = \frac{995,68 + 1055,15}{2} \cdot 0,290 \cdot 10^{-3} = 0,3 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$$

$$A_{4D} = A_{j4D} \cdot V_3 = 0,3 \cdot 201,062 = 60,32 \text{ J}$$

Hlava:

$$A_{j4H} = \frac{\sigma_{p2} + \sigma_{p3}}{2} \cdot \varphi_1 \cdot 10^{-3} = \frac{995,68 + 1018,35}{2} \cdot 0,918 \cdot 10^{-3} = 0,92 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$$

$$A_{4H} = A_{j4H} \cdot (V_4 + V_5) = 0,92 \cdot (353,459 + 164,808) = 476,81 \text{ J}$$

- **Tvářecí síla:**

$$F_4 = \sigma_{D4H} \cdot \frac{\pi \cdot D_5^2}{4} = 1107,86 \cdot \frac{\pi \cdot 15^2}{4} = 195775,02 \text{ N}$$

### 3.9 Celková práce, síla a výkon [2], [11]

Pro celkovou práci je nutno sečíst všechny přetvárné práce v jednotlivých operacích. Výsledný vzorec tedy bude mít podobu (3.17).

$$A_C = A_1 + A_2 + A_3 + A_{4D} + A_{4H} = 214,16 + 265,76 + 72,32 + 60,32 + 476,81$$

$$A_C = 1089,37 \text{ J} \quad (3.17)$$

Obdobně jako při výpočtu celkové síly je nutno sečíst všechny síly potřebné pro výrobu. Součet celkové síly je zapsán v rovnici (3.18).

$$F_C = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 61778,69 + 53599,41 + 57356,6 + 195775,02 \quad (3.18)$$

$$F_C = 368509,72 \text{ N} = 368,5 \text{ kN}$$

K dalším z důležitých faktorů při volbě tvářecího stroje je výkon, který je nutný pro volbu správného pohonu stroje. Pro vyráběný čep je výkon vypočten ze vzorce (2.11).

$$P = \frac{A_C \cdot n_{zdvih}}{t} = \frac{1089,37 \cdot 160}{60} = 2904,97 \text{ W}$$

### 3.10 Volba stroje [31], [32]

Tvářecí stroj byl navrhován vzhledem k celkové sériovosti, velikosti tvářecí síly a výkonu. Z pohledu sériovosti, která činí  $500\,000 \text{ ks} \cdot \text{rok}^{-1}$ , je nutno volit více operační automat. Vypočtená síla je rovna  $F_C = 368,5 \text{ kN}$ . Stroj tedy musí mít jmenovitou sílu vyšší než je vypočtená hodnota. K správnému chodu je také zapotřebí zvolit automat s pohonem přesahující výkon  $P = 2,9 \text{ kW}$ .

Pro zmíněné podmínky se jako nejvhodnější možnost jeví více operační automat AKP 3-5 od firmy Hatebur. Tento stroj má jmenovitou sílu 850 kN, výkon 35 kW a možnost tvářet až v 5 operacích. Ostatní parametry jsou vedeny v tabulce 7. Tvářecí stroj je vyobrazen na obrázku 40.

Tab. 7 Parametry stroje [32]

Technický údaj	Hodnota
Počet tvářecích stanic [-]	5
Maximální průměr [mm]	22
Délka polotovaru [mm]	90
Počet zdvihů [ $\text{min}^{-1}$ ]	150-210
Zdvih beranu [mm]	78
Výkon [kW]	35
Jmenovitá síla [kN]	850



Obr. 40 Hatebur AKP 3-5 [32]



## 4 NÁVRH SESTAVY NÁSTROJE [2], [11], [13], [14]

Pro výrobu součásti je velmi podstatný nástroj. Ten musí mít správnou geometrii, s vhodnou tolerancí na funkčních plochách. Nástroj jako celek musí být nástroj především funkční. Jako vzorová ukázka návrhu nástroje bude zhotovena průtláčnice a průtláčník pro první protlačovací operaci. Jedná se tak o druhou operaci v celém výrobním postupu.

### 4.1 Návrh průtláčnice [1], [11], [29], [30]

Jak již bylo zmíněno, průtláčnice bude navrhována pro první protlačovací operaci. Jako materiál pro výrobu byla volena ocel 19 830. Pro výpočet doporučené geometrie je vycházeno z tabulky 5. Tyto hodnoty jsou zakresleny v obrázku 41. Kompletní výkres pýchovnice včetně rozměrů a tolerancí, je uvedena ve výkresové dokumentaci.

$$2\alpha = 2 \cdot 15 = 30^\circ$$

$$R_1 = \frac{D_1 - D_2}{2} = \frac{9,48 - 6,92}{2} = 1,28 \text{ mm}$$

$$R_1 \text{ voleno } 1,3 \text{ mm}$$

$$R_2 = 0,1 \cdot D_2 = 0,1 \cdot 6,92 = 0,69 \text{ mm}$$

$$R_2 \text{ voleno } 0,7 \text{ mm}$$

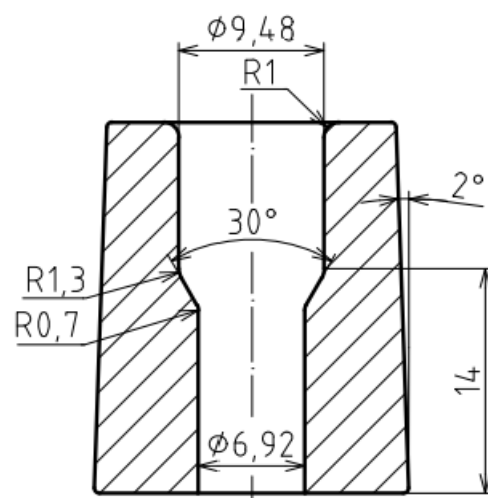
$$R_3 = 0,15 \cdot D_2 = 0,15 \cdot 6,92 = 1,02 \text{ mm}$$

$$R_3 \text{ voleno } 1 \text{ mm}$$

$$H_2 = 1 \cdot D_1 = 1 \cdot 9,48 = 9,48 \text{ mm}$$

$$H_2 \text{ voleno } 14 \text{ mm}$$

$$\gamma - \text{voleno } 2^\circ$$



Obr. 41 Průtláčnice pro 2. operaci

Ke zvýšení životnosti průtláčnice se velmi často používá objímka, která snižuje velikost deformace. Obecně je pro radiální tlak od 1000 MPa do 1600 MPa používána pouze jedna objímka. Pro kontrolu potřeby objímky je nutno prvně vypočítat napětí v kalibračním očku dle vztahu (4.1).

$$\sigma_{pr} = -\sigma_{ps2} \cdot \left[ \left( \frac{\sigma_{p3}}{\sigma_{ps2}} \cdot 4f \cdot \frac{L_3}{D_2} + \frac{tg\alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{\frac{2f}{tg\alpha}} - \frac{tg\alpha}{f} - 1 \right] \quad (4.1)$$

kde:  $\sigma_{pr}$  – napětí v kalibračním očku [MPa].

$$\sigma_{pr} = -941,75 \cdot \left[ \left( \frac{1019,34}{941,75} \cdot 4 \cdot 0,05 \cdot \frac{2}{6,92} + \frac{tg15^\circ}{0,05} + 1 \right) \cdot \left( \frac{9,48}{6,92} \right)^{\frac{2 \cdot 0,05}{tg15^\circ}} - \frac{tg15^\circ}{0,05} - 1 \right]$$

$$\sigma_{pr} = -807,71 \text{ MPa}$$

Dalším krokem je výpočet osového napětí v zaváděcí části dle rovnice (4.2). V této rovnici figuruje Poissonova konstanta, která je pro předběžně zvolený materiál objímky 19 721 rovna  $\mu = 0,3$ .

$$\sigma_z = \sigma_{pr} \cdot e^{\frac{\mu}{1-\mu} \cdot \frac{4f_1}{D_1} \cdot z} = 807,71 \cdot e^{\frac{0,3}{1-0,3} \cdot \frac{4 \cdot 0,05}{9,48} \cdot 2} = 822,45 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

kde:  $\sigma_z$  – osový napětí [MPa],

$\mu$  – Poissonova konstanta [-].



Finálním krokem pro zjištění potřeby objímky je výpočet radiálního napětí. Toto napětí je vypočteno dle rovnice (4.3), kde pro vyšší jistotu je volena horší varianta z rozmezí 0,75 až 0,85.

$$\sigma_r = (0,75 \div 0,85) \cdot \sigma_z = 0,85 \cdot 822,45 = 699,08 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

kde:  $\sigma_r$  – radiální napětí [MPa].

Výsledné radiální napětí vyšlo 699,08 MPa. Toto napětí je menší než 1000 MPa a není tedy nutné pro průtlačnici použít žádné objímky. S ohledem na velkou sérii výroby je ale vhodné objímku použít z důvodu menšího opotřebení nástroje. Ve finálním návrhu nástroje tedy bude objímka využita.

## 4.2 Návrh průtlačníku [1], [2], [11], [29], [30]

Obdobně jako u návrhu průtlačnice, bude průtlačník navržen pro druhou tvářecí operaci. Jako materiál průtlačníku byla volena ocel 19 830. Pro výpočet doporučených rozměrů bylo vycházeno z obrázku uvedeného v příloze 1. Průtlačník s doporučenými rozměry je na obrázku 42. Kompletní výkres je pak obsažen ve výkresové dokumentaci.

$$d_1 = 1,3 \cdot D_1 = 1,3 \cdot 9,48 = 12,32 \text{ mm} \quad \text{voleno } 13 \text{ mm} \quad (4.4)$$

$$d_2 = 1,6 \cdot D_1 = 1,6 \cdot 9,48 = 15,17 \text{ mm} \quad \text{voleno } 16 \text{ mm} \quad (4.5)$$

$$h \leq 3 \cdot D_1 = 3 \cdot 9,48 = 28,44 \text{ mm} \quad \text{voleno } 25 \text{ mm} \quad (4.6)$$

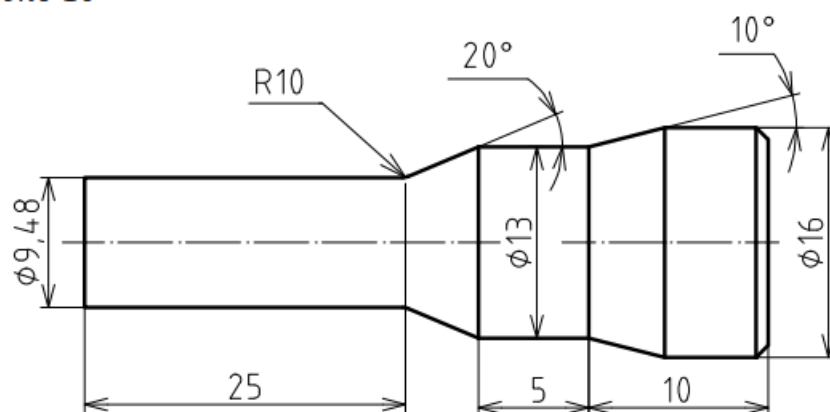
$$h_1 = 0,5 \cdot D_1 = 0,5 \cdot 9,48 = 4,74 \text{ mm} \quad \text{voleno } 5 \text{ mm} \quad (4.7)$$

$$h_2 \geq 0,5 \cdot d_2 = 0,5 \cdot 16 = 8 \text{ mm} \quad \text{voleno } 10 \text{ mm} \quad (4.8)$$

$$R_1 = 9,48 \text{ mm} \quad \text{voleno } 10 \text{ mm}$$

$$\gamma - \text{voleno } 20^\circ$$

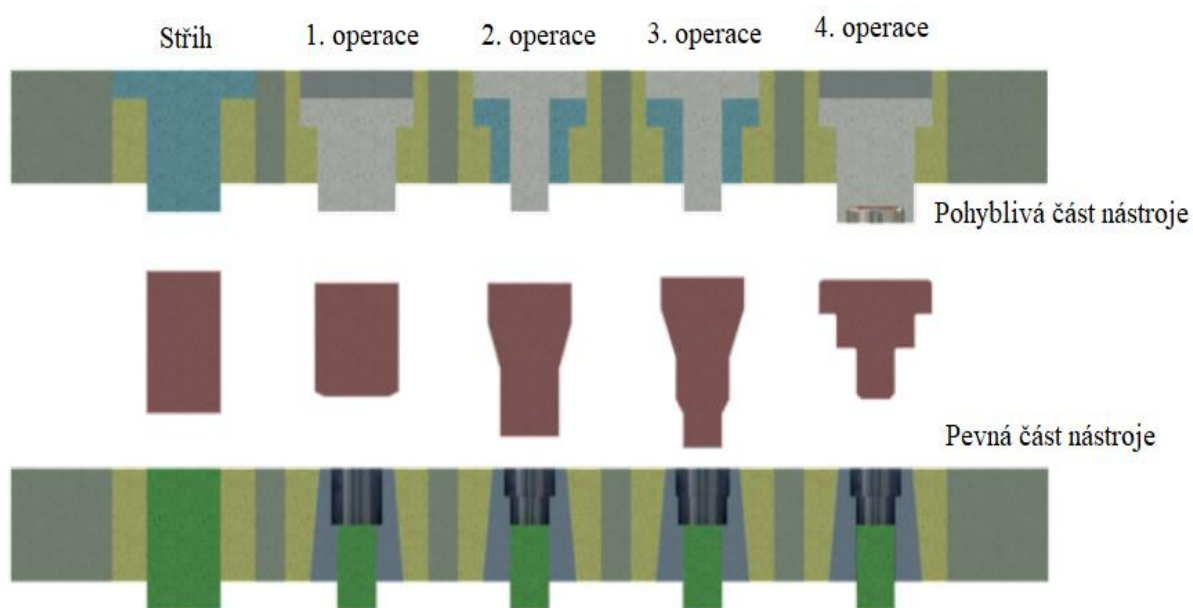
$$\delta - \text{voleno } 10^\circ$$



Obr. 42 Průtlačník pro 2. operaci

## 4.3 Sestrojení nástroje [2], [11]

Pro výrobu čepu bude navržen postupový nástroj, podle výrobní varianty A. Jak již bylo zmíněno, součást bude vyráběna v pěti operacích včetně stříhu. Nástroj tedy bude obsahovat dva nástroje pro přechování a dva pro protlačování, což umožní vyrobit požadovaný čep. Postupový nástroj je schematicky vyobrazen na obrázku 42. Bude zde využito vypočtených a navržených hodnot z již zmíněných návrhů průtlačnice a průtlačníku. Pro názornost je v obrázku doplněný postup výroby ve zvětšeném měřítku.



Obr. 43 Postupový nástroj [2]

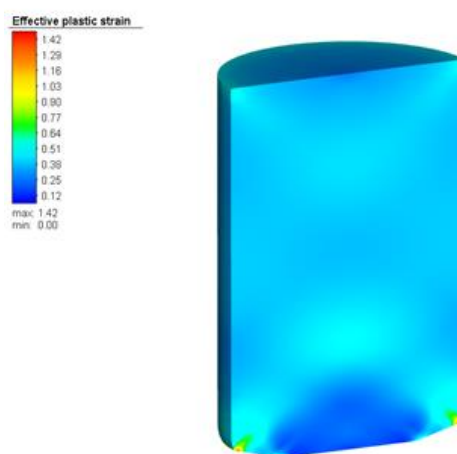
Nástroj jak celek se skládá ze dvou hlavních částí, přičemž jedna je pohyblivá a druhá ne. Na obrázku 43 je nepohyblivá část ve spodní části. Obsahuje průtlačnice, pěchovnice a k nim případné objímky. Mezi důležité součásti patří i vyhazovače napomáhající vyzvednutí součásti do čelistí, které přenesou polotvar k dalšímu tváření.

Ve vrchní části obrázku je druhá část nástroje. Tato část je již pohyblivá a obsahuje pěchovníky, průtlačníky a součást k upnutí a zajištění polohy.

## 5 NUMERICKÉ SIMULACE [33]

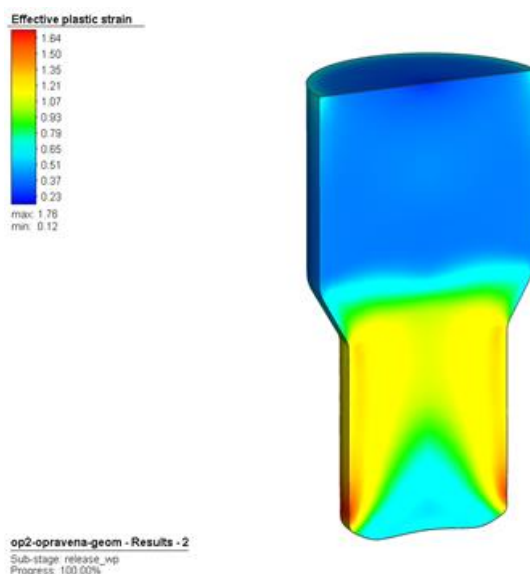
Pro ověření výsledků je možné využít metodu konečných prvků v numerických simulacích. Z vytvořených nástrojů a vypočtených polotovarů v jednotlivých operacích je pak možno získat efektivní plastické přetvoření a průběh síly na dráze.

- **1. operace** – V průběhu první operace dochází k přechovávání pro zarovnání čel. V celém průběhu objemu polotvaru, je přetvoření téměř rovnoměrné viz obrázek 44. Jediná odchylka je na spodní části, kde hodnoty dosahují  $\varphi_{ef}=1,42$  z důvodu redukčního úhlu přizpůsobeného pro další operace. Při porovnání analogicky vypočtené síly  $F_1 = 61,7$  kN a síly  $F_{1s} = 90$  kN vypočtenou simulací, je možné uvažovat analogicky vypočtenou sílu jako aproximaci křivky simulací. Důkazem tvrzení je graf obsažen v 2. příloze.



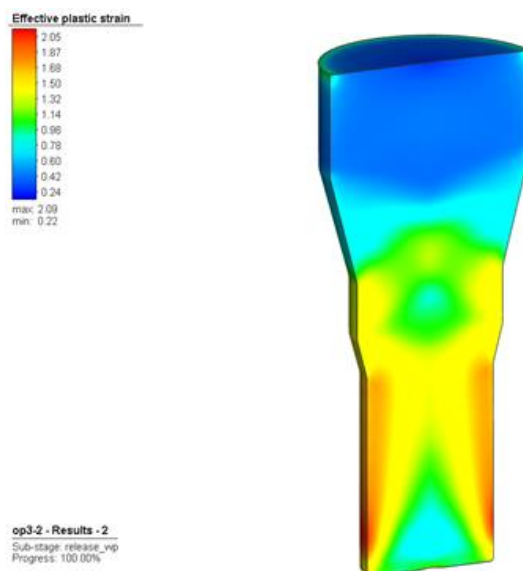
Obr. 44 Přetvoření v 1. operace

- **2. operace** – Zde dochází k dopřednému protlačování a výrazné změně přetvoření. Hodnoty v dríku II jsou v intervalu 0,93 až 1,5, přičemž hlava čepu je téměř beze změny, což je patrné z obrázku 45. U porovnání sil v druhé operaci je analogicky vypočtená hodnota  $F_2 = 53,5$  kN. Je tedy vyšší, než síla u simulací, která dosahuje hodnoty  $F_{2s} = 40$  kN. Tento průběh síly je znázorněn grafem v příloze 3.



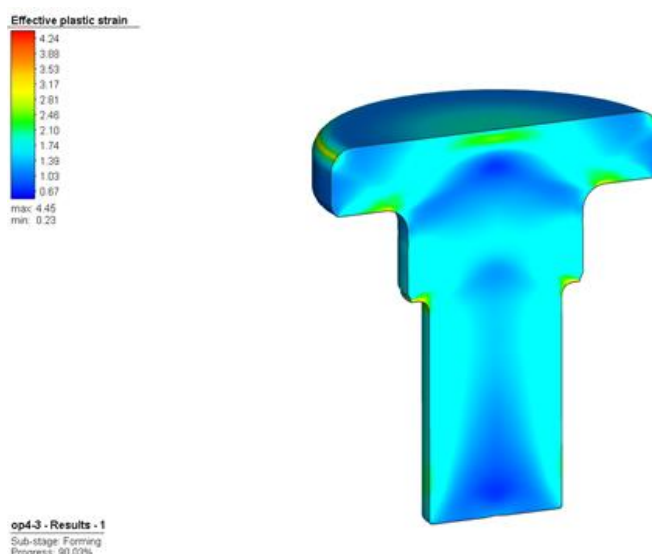
Obr. 45 Přetvoření ve 2. operace

- **3. operace** – V třetí operaci se již tvaruje i druhá část dříku za pomoci dopředného protlačování. Efektivní přetvoření zde nabývá největší hodnoty po obvodu zmíněného dříku I, kde bodově dosahují efektivního přetvoření až  $\varphi_{ef}=1,87$  viz obrázek 36. Vypočtené síly se liší přibližně o 12,3 kN. Tento rozdíl je tvořen prudkým nárůstem způsobeným kalibrací viz příloha 4.



Obr. 46 Přetvoření ve 3. operace

- **4. operace** – Ve čtvrté operaci dochází k finálním úpravám a to napěchování hlavy a dříku II na konečný rozměr. Efektivní přetvoření je obdobně jako u první operace téměř konstantní a pohybuje se přibližně okolo  $\varphi_{ef} = 1,4$ . V určitých částech pak přetvoření dosahuje vyšších hodnot okolo  $\varphi_{ef}=2,8$ . Problém ale nastává v přechodu  $\varnothing 8$  mm na  $\varnothing 6$  mm. Materiál zde zcela nezateče do požadovaného rozměru. Simulace odhalila, že k úplnému vyplnění dutiny průtláčnice chybí cca 0,1 mm. Potřebná optimalizace může být směřována na úpravu geometrie výrobku, nebo změnu redukčního úhlu v průběhu tváření. Obdobně jako u předešlých operací, lze porovnat průběh síly. Jak již bylo zmíněno, tak v poslední části tváření se kalibruje na konečné rozměry součásti. Tento jev je viditelný i v průběhu práce viz příloha 5, kde síla exponenciálně roste až k hodnotě  $F_{4s} = 250$  kN. Při analogickém výpočtu je síla rovna  $F_4 = 195,7$  kN a je zde rozdíl téměř 60 kN.



Obr. 47 Přetvoření ve 4. operace

## 6 ZÁVĚRY

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout vhodnou variantu výroby rotačně symetrického spojovacího čepu z oceli 11 320-5R. Pro výrobu bylo navrženo několik možností výroby. Jako nejvhodnější možnost vzhledem k roční sériovosti, která činí  $500\,000 \text{ ks} \cdot \text{rok}^{-1}$ , byla volena technologie objemového tváření za studena. Konkrétně se jedná o pěchování a dopředné protlačování.

V následující části práce byl zpracován návrh technologie výroby. Z předešlé literární rešerše byly navrženy dvě výrobní varianty A a B. U obou bylo využito metody optimalizace zpevnění v jednotlivých částech součásti. Při volbě vhodného postupu výroby hrálo roli logaritmické přetvoření, které je pro variantu A menší v části dříku I, a byla tedy volena tato možnost. Výrobní postup začíná u odstříhnutí polotovaru o  $\varnothing 8 \text{ mm}$  ze svitku, který dále pokračuje k první operaci zarovnání čel pěchováním. V dalších dvou operacích dochází k dopřednému protlačování a vytvarování dříku I a dříku II. Finální operací je pěchování, kde dochází k dotvoření hlavy a dříku II na konečný rozměr.

Dále byly pro zadaný postup vypočteny přetvárné a deformační odpory. Za pomoci deformačního odporu pak byla stanovena potřebná síla v jednotlivých tvářecích operacích. Celková síla potřebná pro výrobu čepu je rovna  $F_c = 368,5 \text{ kN}$ . Volený stroj tedy musel mít minimální jmenovitou sílu vyšší než zmíněná hodnota, a proto byl volen postupový automat AKP 3-5 od firmy Hatebur.

Pro výrobu součásti byl v dalším kroku navržen postupový nástroj, který byl poté použit pro numerické simulace. Z těchto simulací lze poté vyčíst, že materiál dokonale nezatéká do rohů u přechodu dříku I a dříku II. Toto by bylo možné vyřešit buďto optimalizací rádiusu  $R_{0,5}$ , který by se musel dle požadavků protikusu zvětšit, nebo změnou redukčního úhlu v průběhu tváření.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [34]

1. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II* [online]. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004 [cit. 2021-5-9]. ISBN 80-214-2683-7. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:fc3098d0-8af6-11e6-88c5-005056827e52?page=uuid:abd085a0-9fb7-11e6-9328-005056825209>
2. BABOR, Karel, Jan FIALA a Augustin CVILINEK. *Objemové tváření ocelí* [online]. Praha: SNTL, 1967 [cit. 2021-5-16]. Řada strojírenské literatury. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:476c4e20-a69e-11e2-b6da-005056827e52?page=uuid:7c56ac50-b69a-11e2-ada5-005056825209>
3. *Gestión de Compras designs* [online]. Albacete [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.gestiondecompras.com/en/products/forging/cold-forging>
4. *Indiamart* [online]. Chennani, 2007 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/special-cold-forging-parts-18286790512.html>
5. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIMUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
6. FOREJT, Milan. *Mechanické vlastnosti vybraných ocelí za vyšších rychlostí deformace: Databáze materiálových modelů k predikci chování materiálů v tvářecím procesu* [online]. [s.l.], 2004. 5 s. Grant ČR. VUT, FSI, Ústav strojírenské technologie, odbor tváření. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/databaze/ocel\\_113205r.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/databaze/ocel_113205r.pdf)
7. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I.* [online]. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003 [cit. 2021-5-16]. ISBN 80-7204-283-1. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:d1d1a850-fd1c-11e8-bc37-005056827e51?page=uuid:0568ea10-038b-11e9-95ba-5ef3fc9bb22f>
8. BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie slévání* [online]. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006 [cit. 2021-5-16]. ISBN 80-7043-491-0. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:7d8e8700-de76-11e8-a5a4-005056827e52?page=uuid:8f27e8d0-f811-11e8-9210-5ef3fc9bb22f>
9. *Reliance Foundry* [online]. Cobourg [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.reliance-foundry.com/blog/cast-steel#gref>
10. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění* [online]. Brno: CERM, 2001 [cit. 2021-5-16]. ISBN 80-214-1996-2. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:fae229c0-1e7c-11e2-a61d-005056827e52?page=uuid:ba5631fe-2a97-47ce-d27d-8ed286fdd23c>
11. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje* [online]. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006 [cit. 2021-5-16]. ISBN 80-214-2374-9. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:0ec08710-3486-11e7-8e0f-005056827e52?page=uuid:ba1c0300-40ac-11e7-b3c8-005056825209>
12. *Tech Magazin* [online]. Praha, 2010 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/47687>
13. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2., v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.

14. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
15. ŽÍDEK, Milan, Vladimír DĚDEK a Boris SOMMER. *Tváření oceli* [online]. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:af0d94f0-8adb-11e2-8593-005056827e52?page=uuid:7df2b71e-5bcc-a272-831c-420851cf6d2f>
16. LENFELD, Petr. *Technologie II* [online]. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009 [cit. 2021-5-16]. ISBN 978-80-7372-466-5. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:e5ff7880-eca9-11e3-a2c6-005056827e51?page=uuid:ba518210-ff4f-11e3-9806-005056825209>
17. HRUBÝ, Jiří, Stanislav RUSZ a Radek ČADA. *Strojírenské tváření* [online]. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006 [cit. 2021-5-16]. ISBN 80-248-1218-5. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:59d57c40-8cb2-11e7-a9c3-005056827e52?page=uuid:7d5a3460-9970-11e7-8394-5ef3fc9ae867>
18. ČADA, Radek. *Technologie tváření, slévání a svařování: plastická deformace kovů, tažení plechu, ohýbání, objemové tváření zastudena*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3981-3.
19. ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů* [online]. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992 [cit. 2021-5-16]. Technický průvodce. ISBN 80-03-00651-1. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:2a960910-2757-11e2-a433-005056827e52?page=uuid:afb20857-a68b-b156-7061-1cea6156b58e>
20. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.
21. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. [online]. Brno: CERM, 2001 [cit. 2021-5-16]. ISBN 80-7204-193-2. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:af9ed250-b78a-11e6-a108-005056827e51?page=uuid:5b7bd020-c66b-11e6-ac1c-001018b5eb5c>
22. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II* [online]. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002 [cit. 2021-5-16]. ISBN 80-7204-248-3. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:b45814a0-b78a-11e6-a108-005056827e51?page=uuid:7137b730-c657-11e6-bf97-005056825209>
23. ČADA, Radek. *Technologie I: část tváření a slévání : (návodů do cvičení)* [online]. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005 [cit. 2021-5-16]. ISBN 978-80-248-0795-9. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:4a1a9e30-8956-11e6-84e2-005056827e51?page=uuid:7c366bd0-97cd-11e6-89b1-5ef3fc9ae867>
24. HEMR, František. *Protlačování oceli za studena* [online]. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963 [cit. 2021-5-16]. Knihnice strojírenské výroby. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:aeee3ee0-6238-11e8-be96-005056827e52?page=uuid:f2723520-899a-11e8-ad64-005056825209>
25. MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů* [online]. 3. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006 [cit. 2021-5-16]. ISBN 80-248-1217-7. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:58696920-8cb2-11e7-a9c3-005056827e52?page=uuid:eef13250-9974-11e7-920d-005056827e51>



26. *Hatebur* [online]. Basilej [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: [https://www.hatebur.com/en/machines-accessories/machines?tx\\_products\\_browser%5Baction%5D=show&tx\\_products\\_browser%5Bbrand%5D%5B0%5D=1&tx\\_products\\_browser%5Bcontroller%5D=Products&tx\\_products\\_browser%5Bmodel%5D=8&tx\\_products\\_browser%5Bproduct%5D=49&Hash=cd1d6376c6eccf7da7a33f468565359f](https://www.hatebur.com/en/machines-accessories/machines?tx_products_browser%5Baction%5D=show&tx_products_browser%5Bbrand%5D%5B0%5D=1&tx_products_browser%5Bcontroller%5D=Products&tx_products_browser%5Bmodel%5D=8&tx_products_browser%5Bproduct%5D=49&Hash=cd1d6376c6eccf7da7a33f468565359f)
27. MICHAL, Petr. Výpočty povrchu a objemu těles [online]. Nové Město nad Metují: ČVUT v PRAZE, 2010 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: [http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2010/sbornik\\_2010/](http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2010/sbornik_2010/)
28. ČADA, Radek. Technologie tváření a slévání – v příkladech [online]. Vysoká škola Báňská, Fakulta strojů, Technická Univerzita Ostrava, 2013, 23 s. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_005/](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_005/).
29. *Ferona online* [online]. Praha, 2001 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/vyhledavani/307>
30. Rychlořezné oceli - RAPIDUR. SCHMOLZ+BICKENBACH [online]. Kladno, 2004 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.schmolz-bickenbach.cz/rychlomeznanastrojova.html>
31. *Hatebur* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.hatebur.com/de/>
32. *Forming technology* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://se-pdf.s3.amazonaws.com/pdf/1044/1.pdf>
33. *Simufact* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/>
34. *Ciatce PRO* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/info>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Přetvárná práce	[J]
A <sub>5</sub>	Tažnost	[%]
A <sub>j</sub>	Měrná přetvárná práce	[J·mm <sup>-3</sup> ]
A <sub>ji</sub>	Měrná přetvárná práce v jednotlivých operacích	[J·mm <sup>-3</sup> ]
C	Citlivost na rychlost deformace	[-]
D <sub>i</sub> , d <sub>i</sub>	Průměr	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[GPa]
F <sub>i</sub>	Tvářecí síla v jednotlivých operacích	[N]
F <sub>is</sub>	Tvářecí síla v jednotlivých simulacích	[kN]
F <sub>p</sub>	Tvářecí síla	[N]
f <sub>i</sub>	Součinitel tření	[-]
H <sub>i</sub> , h <sub>i</sub>	Výška	[mm]
h <sub>beranu</sub>	Zdvih beranu	[mm]
h <sub>d</sub>	Vztažná výška	[mm]
k	Materiálová konstanta	[MPa]
k <sub>1</sub>	Součinitel charakteru deformace	[-]
k <sub>2</sub>	Součinitel charakteru napětí	[-]
L <sub>1</sub>	Výška části kontejneru	[mm]
L <sub>3</sub>	Výška redukčního oka	[mm]
m	Exponent citlivosti s ohledem na rychlost deformace	[-]
m <sub>s</sub>	Hmotnost	[kg]
n	Exponent zpevnění	[-]
n <sub>zdvih</sub>	Počet zdvihů beranu	[min <sup>-1</sup> ]
P	Výkon	[W]
R	Konečný poloměr	[m]
R <sub>i</sub>	Poloměr zaoblení nástrojů	[mm]
R <sub>o</sub>	Výchozí poloměr	[m]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	Mez kluzu	[MPa]
S <sub>i</sub>	Obsah	[mm <sup>2</sup> ]
s	Dráha pohybu nástroje	[mm]
T	Teplota materiálu	[K]
T <sub>m</sub>	Teplota tavení	[K]
T <sub>o</sub>	Referenční teplota	[K]
t	Čas	[s]
V <sub>i</sub>	Objem	[mm <sup>3</sup> ]
V <sub>c</sub>	Celkový objem	[mm <sup>3</sup> ]
v <sub>o</sub>	Rychlost pohybu nástroje	[m·s <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	Redukční úhel	[°]
$\hat{\alpha}$	Úhel kužele v obloukové míře	[rad]
$\varepsilon$	poměrné přetvoření	[%]
$\mu$	Poissonova konstanta	[-]
$\rho$	Hustota	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\varphi$	Logaritmické přetvoření	[-]
$\varphi_{ef}$	Efektivní logaritmické přetvoření	[-]

$\dot{\varphi}$	Rychlost deformace	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\varphi}_i$	Rychlost deformace v jednotlivých operacích	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\varphi}_o$	Referenční rychlost přetvoření	[s <sup>-1</sup> ]
$\sigma_D$	Střední napětí	[MPa]
$\sigma_{Di}$	Střední napětí v jednotlivých operacích	[MPa]
$\sigma_o$	Statická mez kluzu	[MPa]
$\sigma_p$	Přirozený přetvárný odpor	[MPa]
$\sigma_{pi}$	Přirozený přetvárný odpor v jednotlivých operacích	[MPa]
$\sigma_{pr}$	Napětí v kalibračním očku	[MPa]
$\sigma_{psi}$	Přirozený přetvárný odpor	[MPa]
$\sigma_r$	Radiální napětí	[MPa]
$\sigma_z$	Osové napětí	[MPa]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady výrobků zhotovených protlačováním za studena [4] .....	9
Obr. 2 Vyráběný dílec.....	10
Obr. 3 Odlévání [9] .....	11
Obr. 4 Soustružení [12].....	11
Obr. 5 Protlačovací automat [3].....	12
Obr. 6 Průběh deformace[11] .....	13
Obr. 7 Typy protlačování [11] .....	14
Obr. 8 Princip pýchování[13].....	14
Obr. 9 Rozměry pýchované součásti [2] .....	15
Obr. 10 Průběh práce při pýchování [2].....	16
Obr. 11 Princip dopředného protlačování .....	17
Obr. 12 Schéma výrobků [2].....	17
Obr. 13 Průběh práce při protlačování [2] .....	19
Obr. 14 Počáteční fáze [20] .....	19
Obr. 15 Závěrné stádium [20].....	19
Obr. 16 Vhodné součásti výroby [17].....	21
Obr. 17 Technologičnost ostrých hran [17] .....	21
Obr. 18 Globulární perlit [21].....	22
Obr. 19 Závislost času na teplotě [21] .....	22
Obr. 20 Rozměry pýchovníku [11] .....	24
Obr. 21 Pýchovnice [11] .....	24
Obr. 22 Průtláčnický [11] .....	25
Obr. 23 Ztráta stability nástroje [11] .....	25
Obr. 24 Průtláčnice [11].....	25
Obr. 25 Části průtláčnice [11].....	26
Obr. 26 Dělené průtláčnice [11] .....	26
Obr. 27 Víceoperační automat Hatebur [26] .....	27
Obr. 28 Rozměry čepu .....	28
Obr. 29 Rozdělení objemů .....	28
Obr. 30 Rozdělení čepu .....	29
Obr. 31 Varianta A.....	30
Obr. 32 Přetvoření varianta A.....	31
Obr. 33 Varianta B.....	31
Obr. 34 Přetvoření varianta B .....	32
Obr. 35 Výšky varianty A.....	33
Obr. 36 1. Operace .....	34
Obr. 37 2. Operace .....	34
Obr. 38 3. Operace .....	34
Obr. 39 4. Operace .....	35
Obr. 40 Hatebur AKP 3-5 .....	39
Obr. 41 Průtláčnice pro 2. operaci .....	40
Obr. 42 Průtláčnický pro 2. operaci.....	41
Obr. 43 Postupový nástroj [2].....	42
Obr. 44 Přetvoření 1.operace .....	43
Obr. 45 Přetvoření 2.operace .....	43
Obr. 46 Přetvoření 3.operace .....	44
Obr. 47 Přetvoření 4.operace .....	44

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní mechanické vlastnosti 11 320-5R [6] .....	10
Tab. 2 Chemické složení 11 320-5R [6] .....	10
Tab. 3 Materiály vhodné pro nástroje [2] .....	23
Tab. 4 Doporučené rozměry pýchovníku [11] .....	24
Tab. 5 Doporučené rozměry průtláčníce [11] .....	26
Tab. 6 Johnson-Cook hodnoty [6] .....	35
Tab. 7 Parametry stroje [32] .....	39

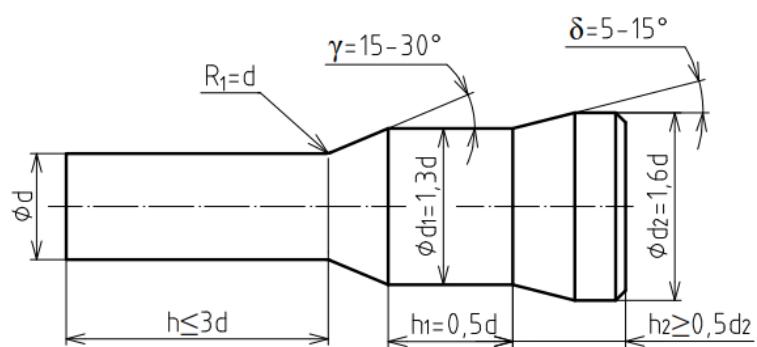
## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Parametry pro určení průtlačníku [11]
Příloha 2	Závislost síly na dráze v 1. operaci
Příloha 3	Závislost síly na dráze ve 2. operaci
Příloha 4	Závislost síly na dráze ve 3. operaci
Příloha 5	Závislost síly na dráze ve 4. operaci

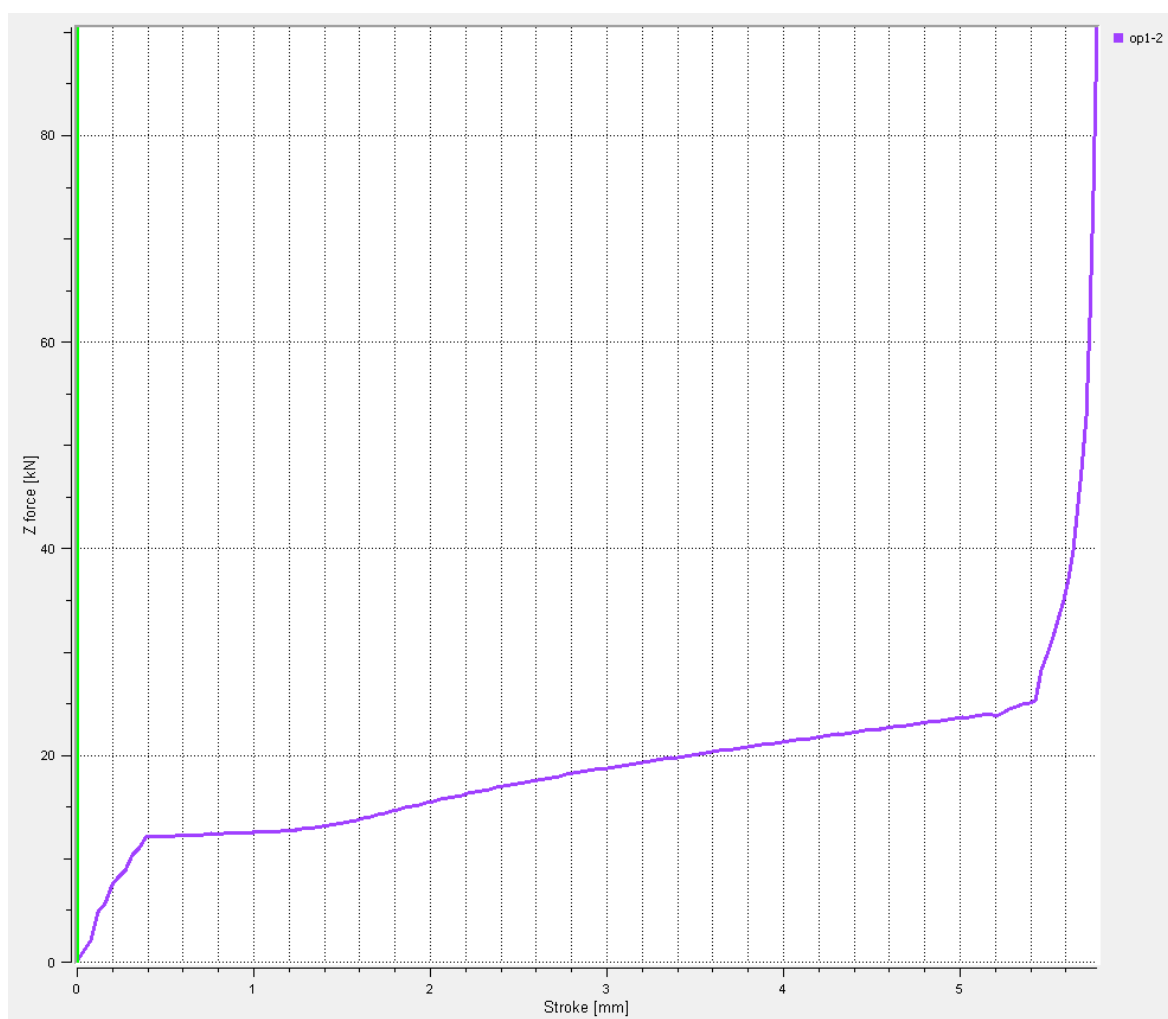
## SEZNAM VÝKRESŮ

Čep	BP-01-208431
Průtlačnice 2. operace	BP-02-208431
Průtlačník 2. operace	BP-03-208431
Postupový nástroj	BP-04-208431
Kusovník	BP-05-208431

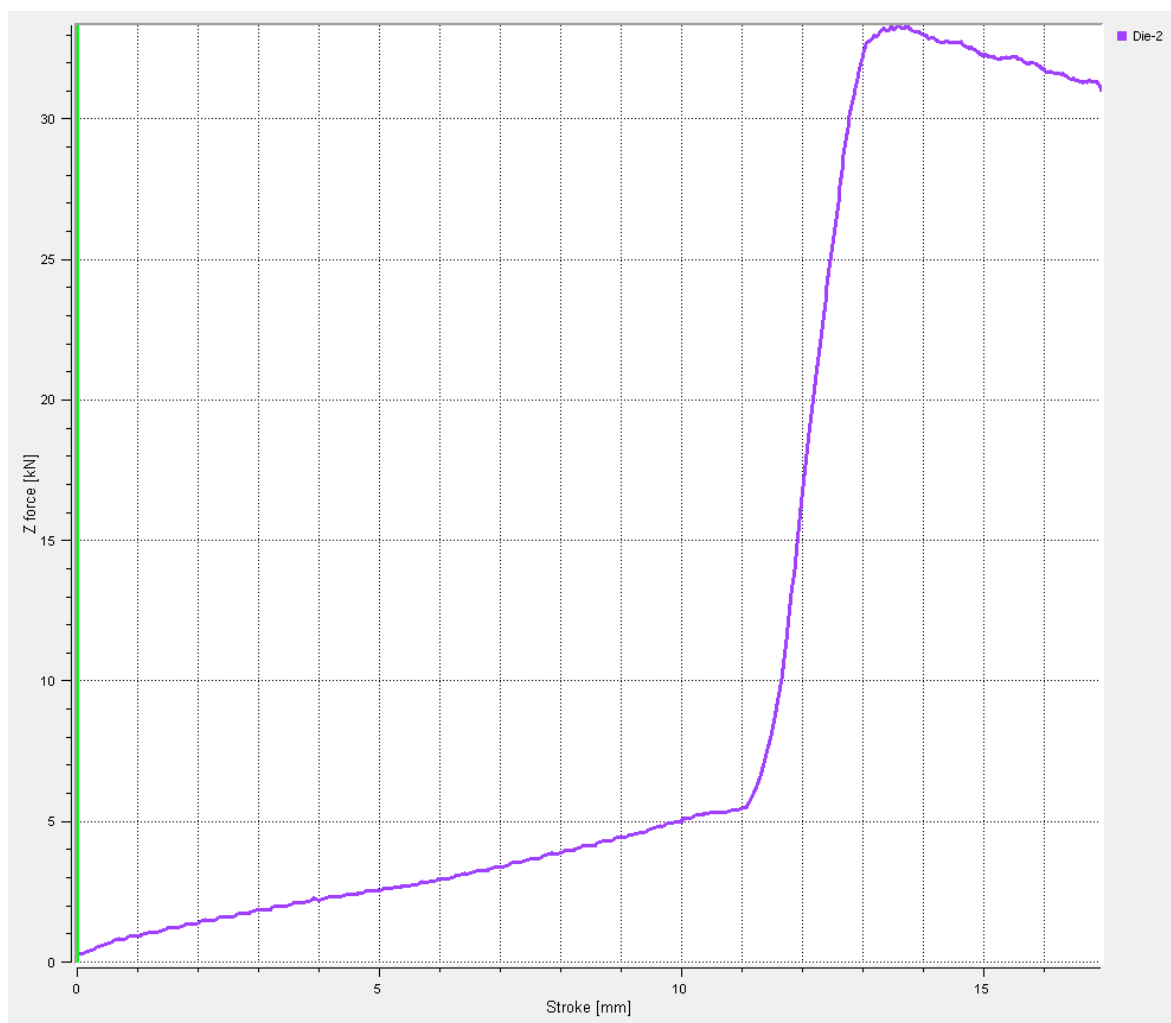
## Příloha 1 Parametry pro určení průtlačníku [11]



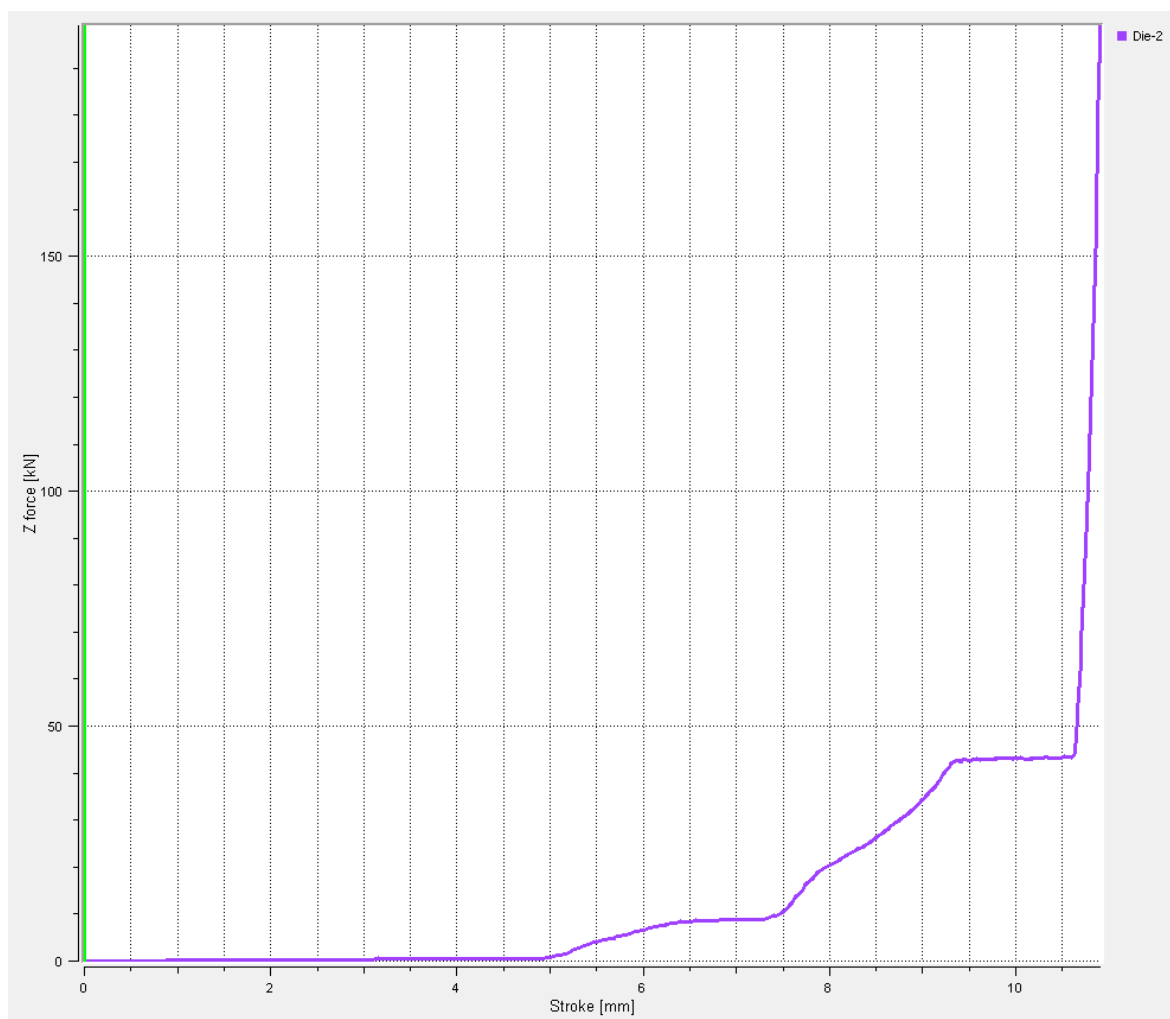
## Příloha 2 Závislost síly na dráze v 1. operaci



### Příloha 3      Závislost síly na dráze ve 2. operaci



#### Příloha 4      Závislost síly na dráze ve 3. operaci





## Příloha 5      Závislost síly na dráze ve 4. operaci

